

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

FACULTAD DE QUIMICA E INGENIERIA QUIMICA

UNIDAD DE POSGRADO

**“ESTUDIO DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE DOS
TIPOS DE ACERO DE BAJO CARBONO EN INSTALACIONES
INDUSTRIALES PETROLERAS CERCANAS AL MAR EN EL
NOR OESTE DEL PERÚ”**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Magíster en Química con mención en
Fisicoquímica

AUTOR:

Claver Hugo Guerra Carvallo

ASESOR:

Mario Ceroni Galloso

LIMA – PERÚ

2014

DEDICATORIA

Dedico esta obra con mucho cariño y amor a mi esposa Rossana, a mis hijas Mónica y Nebai, a mis queridos padres y a todos los que han contribuido con mi formación profesional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a PETROBRAS ENERGIA PERU S.A. el apoyo brindado en la realización de este estudio. También aprecio el soporte técnico del Instituto de Corrosión y Protección de la PUCP, Laboratorio BISA. Laboratorio MYAP, Laboratorio USAQ de UNMSMS, Laboratorio de INGEMMET.

Especial reconocimiento a mi asesor de tesis Dr. Mario Ceroni, a los Ingenieros Anthony Alfaro, Milton Ramírez, Josmell Córdova Claros y todos los amigos de PETROBRAS ENERGIA PERU S.A. que de diferentes maneras han contribuido en obtener los logros presentados en esta obra.

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	5
1.4. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA.....	6
1.5. OBJETIVOS	6
1.5.1. <i>Objetivo general</i>	6
1.5.2. <i>Objetivos específicos</i>	6
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. BASES TEÓRICAS	7
2.2. TIPOS DE CORROSIÓN.....	10
2.2.1. <i>Corrosión industrial</i>	10
2.2.2. <i>Corrosión marina</i>	11
2.2.3. <i>Corrosión rural</i>	11
2.2.4. <i>Corrosión en interiores</i>	11
2.3. FACTORES QUE AFECTAN LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA	12
2.3.1. <i>Humedad</i>	12
2.3.2. <i>Temperatura</i>	13
2.3.3. <i>Salinidad ambiental</i>	13
2.3.4. <i>Depósitos de partículas aerosoles</i>	17

2.3.5. <i>Polución</i>	20
2.3.6. <i>Sólidos circundantes acarreados por el viento</i>	21
2.4. MEDICIÓN DE FACTORES QUE AFECTAN LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA ..	21
2.4.1. <i>Tiempo de humectación</i>	21
2.4.2. <i>Polución</i>	22
2.4.3. <i>Cloruros</i>	23
2.4.4. <i>Probetas (cupones) de corrosión atmosférica, ISSO 9223 (2)</i> ...	24
2.5. CATEGORIZACIÓN DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA	24
2.6. MAPAS DE CORROSIVIDAD.....	26
3. METODOLOGÍA.....	27
3.1. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN PROBETAS DE ACERO AISI/SAE1020 Y ASTM A36	28
3.1.1. <i>Tipo de probetas y dimensiones.</i>	28
3.1.2. <i>Tiempo de exposición</i>	28
3.1.3. <i>Instalación</i>	29
3.2. ESTACIONES DE ESTUDIO.....	30
3.3. COMPOSICIÓN DE LOS ACEROS ESTUDIADOS	31
3.4. PARÁMETROS AMBIENTALES.....	32
3.4.1. <i>Humedad relativa</i>	32
3.4.2. <i>Cloruros</i>	32
3.4.3. <i>Velocidad del viento</i>	33
3.4.4. <i>Polución: medición de PM_{2.5}, H₂S, SO₂ y NO₂</i>	33

3.5.	CARACTERIZACIÓN DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN Y MATERIAL DEPOSITADO SOBRE LAS PROBETAS.....	33
3.6.	MEDICIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE PICADURAS	34
4.	RESULTADOS	35
4.1.	VELOCIDAD DE CORROSIÓN DETERMINADA MEDIANTE LA PÉRDIDA DE PESO DE PROBETAS DE ACERO EN ESTACIONES. COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	35
4.1.1.	<i>Mediciones al primer año sobre probetas de acero AISI/SAE 1020 y ASTM A36.....</i>	<i>35</i>
4.1.2.	<i>Mediciones al segundo año en probetas de acero ASTM A36 ..</i>	<i>37</i>
4.2.	VELOCIDAD DE PENETRACIÓN DE LAS PICADURAS POR CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN PROBETAS ASTM A36 A 1 Y 2 AÑOS DE EXPOSICIÓN	39
4.2.1.	<i>Mediciones al primer año en probetas de acero AISI/SAE 1020 y ASTM A36</i>	<i>39</i>
4.2.2.	<i>Mediciones al segundo año en probetas de acero ASTM A36. .</i>	<i>40</i>
4.3.	ANÁLISIS DE LA SUPERFICIE DEL METAL CORROÍDO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA Y FLUORESCENCIA DE RAYOS X EN PROBETAS ASTM A36 Y AISI/SAE 1020.....	41
4.3.1.	<i>Análisis de probetas a un año de exposición en la estación E5 PN30, la más cercana al mar.....</i>	<i>41</i>
4.3.2.	<i>Análisis por Microscopia electrónica de depósitos en probetas ASTM A36 a dos años de exposición en la estación E5 PN 30.....</i>	<i>43</i>
4.3.3.	<i>Análisis de depósitos de probetas en Difractometro de Rayos X. Composición de sólidos depositados en probetas de acero.....</i>	<i>44</i>
4.4.	HUMEDAD AMBIENTAL	47
4.5.	CLORUROS EN EL AMBIENTE	48

4.6.	MAPAS DE CORROSIÓN	49
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	52
5.1.	VELOCIDAD DE CORROSIÓN Y SU CATEGORIZACIÓN.	52
5.2.	CARACTERÍSTICAS SUPERFICIALES DE PROBETAS DE ACERO AISI/SAE 1020 Y ASTM A36.....	55
5.3.	PRODUCTOS DE CORROSIÓN Y DEPOSICIÓN DE SÓLIDOS.....	55
5.4.	INFLUENCIA DE CLORUROS SOBRE LA CORROSIÓN.....	59
5.5.	INFLUENCIA DE LA HUMEDAD SOBRE LA CORROSIÓN	60
6.	CONCLUSIONES.....	62
6.1.	REACCIONES QUÍMICAS.	62
6.1.1.	<i>En ambiente cercano al mar</i>	62
6.1.2.	<i>En ambiente lejano al mar</i>	63
6.2.	INFLUENCIA DE GASES POLUCIONANTES	63
6.3.	INFLUENCIA DE LOS CLORUROS	63
6.4.	ESTACIONALIDAD	64
6.5.	PROFUNDIDAD DE PICADURA EN EL TIEMPO.....	64
6.6.	ECUACIÓN GENERAL QUE CORRELACIONA LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN CON EL TIEMPO.	64
6.7.	DETALLES DE COSTRA O CASCARILLA OBTENIDAS EN LAS PROBETAS.....	65
6.8.	MAPAS DE CORROSIÓN.	65
7.	RECOMENDACIONES.....	66
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	68

9. ANEXOS.....	72
-----------------------	-----------

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1.</i> Velocidad de corrosión medida por ultrasonido en ductos de diferentes tiempos de servicio. Las mediciones han sido realizadas de acuerdo a API 570 3rd Ed. Nov. 2009: Piping Inspection Code- In-service Inspection, Rating, Repair, and Alteration of Piping Systems (5).....	5
<i>Tabla 2.</i> Naturaleza de productos de corrosión atmosférica formada en cuatro metales. Roberge P.R.1999.Handbook of Corrosion Engineering. ...	10
<i>Tabla 3.</i> Clasificación de Tiempo de Humectación según ISO 9223 (2).	22
<i>Tabla 4.</i> Clasificación de polución por contenido de sustancias sulfuradas representadas por SO ₂ . El método de determinación de azufre está en el ISO 9223 (3).	23
<i>Tabla 5.</i> Clasificación de polución del aire por el contenido de cloruros, ISO 9223 (2).	24
<i>Tabla 6.</i> Categorías de corrosividad de acero al carbono y su respectivo rango de velocidad de corrosión de, r_{corr} , para el primer año de exposición. ISO 9223.....	26
<i>Tabla 7.</i> Estaciones de estudio, su distancia a la línea de playa y altitud. ...	30
<i>Tabla 8.</i> Composición química de las probetas de acero.	35
<i>Tabla 9.</i> Resultados de velocidad de corrosión después de 1 año de exposición, $\mu\text{m/año}$, en probetas de acero AISI/SAE 1020 y ASTM A36, según ISO 9223. C2 – corrosión baja, C3 – corrosión Media, C4 – corrosión alta.	36
<i>Tabla 10.</i> Ecuaciones de velocidad de corrosión atmosférica de probetas fabricadas con acero AISI/SAE 1020 después de 1 año de exposición.....	37
<i>Tabla 11.</i> Resultados de velocidad de corrosión atmosférica sobre probetas de acero ASTM A36 a 1 y 2 años de exposición.	38

<i>Tabla 12.</i> Velocidad de penetración máxima de corrosión localizada después de 1 año de exposición en aleaciones AISI/SEA 1020 y ASTM A36, μm / año.....	39
<i>Tabla 13.</i> Resultados de medición de la profundidad máxima y mínima de las picaduras al 1er y 2do Año, μm	40
<i>Tabla 14.</i> Resultados de análisis de sólidos retirados de probetas instaladas en estaciones cercanas al mar, después de 396 días de exposición por DRX, %.....	46
<i>Tabla 15.</i> Valores de humedad ambiental relativa medidos con un Termo higrómetro Oakton Modelo P-37250-20.....	48
<i>Tabla 16.</i> Velocidad promedio de deposición de cloruros, determinados según la norma ISO 9223.	49

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Mapa de ubicación del área del Lote X. En círculos de color blanco se señala la ubicación de las estaciones de estudio de corrosión atmosférica	2
<i>Figura 2.</i> Tuberías construidas con acero API 5L Grado B, cercanas al mar. Exteriormente se muestran afectadas severamente por corrosión marina. ...	3
<i>Figura 3.</i> Tuberías construidas con acero API 5L Grado B, cercanas al mar. Exteriormente se muestran afectadas severamente por corrosión marina. ...	3
<i>Figura 4.</i> Tubería instalada alejada a 4 400 metros del mar con una antigüedad de 31 años.	4
<i>Figura 5.</i> Tubería instalada alejada a 11 200 metros del mar con una antigüedad de 31 años.	4
<i>Figura 6.</i> Esquema que muestra la idealización del proceso de corrosión atmosférico sobre una superficie de acero.	8
<i>Figura 7.</i> Bastidor instalado en la estación E9 – estación 951. Podemos apreciar el bastidor porta probetas, el equipo para determinar cloruros y el porta higrómetro.....	29
<i>Figura 8.</i> Mapa de ubicación de las estaciones estudiadas. Los círculos rojos indican la ubicación de las 10 estaciones estudiadas.....	31
<i>Figura 9.</i> Termo higrómetro antes de ser instalado en una de las 3 estaciones monitoreadas.	32
<i>Figura 10.</i> Montaje del equipo capturador de cloruros ambientales. Método llamado de la vela.	33
<i>Figura 11.</i> Velocidad de corrosión atmosférica sobre probetas de acero ASTM A 36 a 1 y 2 años de exposición.	39

Figura 12. Profundidad de picadura, en probetas de acero ASTM A36 después de 2 años de exposición, μm 41

Figura 13. Imágenes SE 100 X de la Muestra E5 12C de la estación PN 30, 398 días de exposición, (Acero AISI 1020): (a) Mezcla de Goethita + Cl (b) Aleación Fe-C + CO_3 con presencia de huecos provocados por corrosión de la probeta y (c) Imagen de Electrón Secundario (Aleación Fe – C + CO_3) con presencia de cavidades provocadas por el proceso de corrosión..... 42

Figura 14. Imágenes SE – 1000X, de la muestra E5 24 A de la estación PN 30 después de 398 días de exposición (Acero ASTM A 36). Análisis puntual (a) Aleación Fe – C (b) Aleación Fe – C + CO_3 con presencia de cavidades provocadas por el proceso de corrosión (c) Imagen de la región corroída con la presencia de CO_3 + Fe – C. 42

Figura 15. Las fotos corresponden a Probetas AISI /SAE 1020 (izquierda) y ASTM A36 (derecha) expuestas por 398 días en la estación E5 Batería PN 30, después de limpieza. La afectación superficial por corrosión es mayor en la aleación AISI/SAE 1020. En ambas la corrosión es tipo localizada. 43

Figura 16. Vista en microscopio de barrido electrónico de la cara interna de una cascarilla depositada en una probeta de acero ASTM A36 después de 2 años de exposición en la estación E5 PN 30. 43

Figura 17. Vista al microscopio electrónico de la cara externa de la película de depósito sobre una probeta de acero ASTM A 36 expuesta por 2 años en la estación E5, PN 30. 44

Figura 18. Difractograma de los depósitos de la Estación E1 PN 33, colectados de probetas expuestas durante 285 días..... 45

Figura 19. Los productos de corrosión en las probetas de estaciones cercanas al mar y expuestas por 396 días son los mismos que se exhiben para los depósitos retirados a los 9 meses (280 días)..... 47

Figura 20. Mapa de corrosión para acero AISI/SAE 1020. Se ha considerado 3 curvas de velocidad de corrosión, 70, 18 y 14 $\mu\text{m/año}$. La de mayor

corrosividad corresponde a áreas cercanas al mar y despejadas de accidentes geográficos que permiten su libre exposición a la brisa marina. 50

Figura 21. Mapa de corrosión para acero ASTM A 36. Se ha considerado 3 curvas de velocidad de corrosión, 40, 18 y 14 $\mu\text{m}/\text{año}$. La de mayor corrosividad corresponde a áreas cercanas al mar y despejadas de accidentes geográficos que permiten su libre exposición a la brisa marina. El resto de áreas tienen similar impacto corrosivo para aceros AISI/SAE 1020 y ASTM A 36..... 51

Figura 22. Velocidad de corrosión en probetas AISI/SAE 1020 durante 1 año de exposición..... 52

Figura 23. Velocidad de Corrosión atmosférica de probetas de Acero AISI /SAE 1020 y ASTM A36 después de 1 año de exposición en las 10 estaciones bajo estudio. 53

Figura 24. Velocidad de penetración de corrosión localizada en aleaciones AISI/SAE 1020 en la estación E3, ubicada en la Batería PN 30..... 55

Figura 25. Productos de corrosión en las probetas AISI/SAE 1020 expuestas por 9 meses. 56

Figura 26. Abundancia de los oxihidróxidos de hierro en las probetas AISI/SAE 1020 expuestas por 9 meses. 57

Figura 27. Sales depositadas presumiblemente por proceso de evaporación de la brisa marina. Estas sales se encontraron preferentemente en probetas de estaciones cercanas al mar. 58

Figura 28. Sólidos ambientales transportados por el viento y encontrados en las probetas después de 9 meses de exposición..... 58

Figura 29. Velocidad de corrosión atmosférica de probetas de acero AISI/SAE 1020 y ASTM A36 versus cloruros, $\text{mg}/\text{m}^2.\text{día}$, en el Lote X. 59

Figura 30. Comportamiento de los cloruros en la atmosfera de las estaciones estudiadas durante el 1er año del estudio. 60

Figura 31. Relación de mediciones de humedad relativa vs. temperatura ambiental en las estaciones E5 y E6. La estación E5 está ubicada en la batería PN 30 y la estación E6 en la Planta de Tratamiento de Crudo (PTC).

..... 61

RESUMEN

Este estudio de tesis, relacionado con la corrosión atmosférica sobre aceros de bajo carbono en instalaciones industriales petroleras, fue realizado en el área del Lote X operado por PETROBRAS ENERGIA PERU S.A. en el noroeste de Perú.

El objetivo consistió en determinar la velocidad de corrosión atmosférica sobre dos aceros de bajo carbono, en diferentes ubicaciones del Lote X, categorizarla de acuerdo a la norma ISO 9223 y mapearla. Se han utilizado probetas de acero, AISI/SAE 1020 y ASTM A 36 ya que estos materiales son usados en la construcción de facilidades de producción, transporte y recolección de petróleo, siendo de mayor uso el acero ASTM A36.

Las probetas fueron instaladas en 10 estaciones y expuestas al ambiente atmosférico en el periodo de septiembre del 2010 a noviembre del 2012. La ubicación de las estaciones fue seleccionada en función de la distancia al mar, altitud, topografía del terreno e impactos industriales, entre otros aspectos.

La velocidad de corrosión y el grado de corrosividad atmosférica fueron determinadas por la pérdida de peso de probetas construidas en acero AISI/SAE 1020, durante un año de exposición. Se han caracterizado los productos de corrosión por difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X y microscopia electrónica. También se estudió el impacto de las siguientes variables ambientales: humedad, cloruros, SO_2 , NO_2 , H_2S y velocidad del viento.

Como resultado de este estudio de tesis, podemos afirmar que en el Lote X la corrosión atmosférica es causada por la acción del oxígeno atmosférico e influenciado por la humedad, salinidad ambiental, por la capacidad del viento para transportar la brisa del mar al continente y polución sólida. Los productos de corrosión encontrados son: oxihidróxidos de hierro, akaganeita, lepidocrocita y goethita. La corrosión es influenciada por los cloruros de una manera polinómicas para los dos tipos de metal evaluados. Asimismo, se

concluye que los gases contaminantes como SO₂, H₂S, NO₂, no influyen en los fenómenos de corrosión. Las áreas próximas al mar y de libre circulación del viento favorecen la corrosión atmosférica y son categorizadas como ambientes de corrosión alta, categoría C4, para acero AISI/SAE 1020 y corrosión media, categoría C3, para acero ASTM A36. Para el resto de áreas la corrosión de ambos materiales es baja, categoría C2.

También podemos concluir que en ambiente marino, el acero ASTM A36 es de mayor resistencia a la corrosión atmosférica del Lote X que el acero especificado bajo norma AISI/SAE 1020.

Gracias a la información obtenida de velocidad de corrosión de este estudio, hemos podido elaborar mapas de corrosión para los dos tipos de acero estudiados, AISI /SAE 1020 y ASTM A 36. Esto es muy importante porque disponer de un mapa, permite una rápida visualización de las áreas de corrosividad crítica y no crítica, especialmente cuando se seleccionan materiales para construcción, selección de sistemas de pintura, selección de procedimientos de preparación de superficie para pintado, estimación de la vida de operación de instalaciones metálicas nuevas y antiguas. En el Lote X, la velocidad de corrosión es mayor en áreas cercanas al mar y de libre exposición a la brisa marina.

El presente trabajo de tesis ha permitido formular una ecuación que estima la corrosión atmosférica sobre probetas de acero al carbono AISI/SAE 1020, para las estaciones lejanas al mar y ubicadas en ambientes secos:

$$C = 164,99 t^{-0,4045}$$

Donde C es la velocidad de corrosión en μm/año y t es el tiempo de exposición en días.

Palabras Clave: corrosión atmosférica, probetas, velocidad de corrosión, categorización de la corrosión, mapas de corrosividad, microscopia electrónica, fluorescencia y difracción de rayos X.

SUMMARY

This thesis studies related to atmospheric corrosion of low-carbon steels in industrial oil was conducted in the area of Block X, operated by PETROBRAS ENERGIA SA PERU in the Northwestern of Peru.

The objective was to determine the atmospheric corrosion rate of two low carbon steels at different locations of Block X, categorize it according to ISO 9223 and map it. Specimens were used steel AISI / SAE 1020 and ASTM A 36 as these materials are used in constructing production facilities, transport and oil collection, being greater use ASTM A36 steel.

The specimens were installed in 10 stations and exposed to atmospheric environment in the period September 2010 to November 2012. The station location was selected based on the distance to the sea, altitude, topography and industrial impacts, among others.

The rate of corrosion and the degree of atmospheric corrosion were determined by weight loss of specimens made of steel AISI / SAE 1020, during a year of exposure. Were characterized corrosion products by X-ray diffraction, X-ray fluorescence and electron microscopy. We also studied the impact of the following environmental variables: moisture, chlorides, SO₂, NO₂, H₂S and wind speed.

As a result of this thesis study, we can affirm that the Block X atmospheric corrosion is caused by the action of atmospheric oxygen and influenced by moisture, environmental salinity and wind capacity to transport the mainland sea breeze and pollution solid.

The corrosion products found are iron oxyhydroxides, akaganeite, lepidocrocite and goethite. Corrosion is influenced by chlorides in a polynomial for the two types of metal evaluated. It is also concluded that the gaseous pollutants such as SO₂, H₂S, NO₂, no influence on the corrosion phenomena.

The areas near the sea are categorized as high corrosion environments, category C4, for steel AISI / SAE 1020 and average corrosion category C3 for ASTM A36 steel. For other areas the corrosion of both materials is low, category C2.

We can also conclude that the ASTM A36 steel is more resistant to atmospheric corrosion of the Block X than AISI / SAE 1020 steel, because it contains manganese and its surface is less rough.

Thanks to the information obtained from corrosion rate of this study it was possible corrosion mapping for both steel types studied, AISI / SAE 1020 and ASTM A 36. This is very important because it allows quick visualization of the areas of critical and noncritical corrosivity, especially when selecting construction materials, paint system selection, selection of surface preparation procedures for painting, estimated operating life old and new features. In Block X, the corrosion rate is higher in areas close to the sea and free exposure to the sea breeze.

This work has allowed us to formulate an equation to estimate the atmospheric corrosion of carbon steel specimens AISI / SAE 1020, after one year of exposure to the stations located far from sea and in dry environments:

$$C = 164,99 t^{-0,4045}$$

Where: C is the corrosion velocity, $\mu\text{m}/\text{year}$ and t is the exposure time, days.

Keywords: Atmospheric corrosion, test specimens, corrosion rate, corrosion categorization, corrosivity maps, electron microscopy, X – ray fluorescence and X – ray diffraction.

1. INTRODUCCIÓN

Descripción de la problemática

El presente estudio de corrosión se circunscribe al Lote X que está ubicado en el noroeste peruano, en la costa del océano Pacífico, concretamente en el distrito de El Alto, provincia de Talara, departamento de Piura y tiene un área de 470 Km² tal como se indica en la figura 1. La actividad industrial que se desarrolla en el Lote X es la explotación petrolera y está a cargo de PETROBRAS Energía Perú S.A. por un contrato que se inició en diciembre de 1996 y culminará en abril del 2024.

En áreas cercanas al mar, la corrosión atmosférica afecta severamente la integridad de las instalaciones metálicas, sin embargo este efecto es mucho menor en áreas alejadas. La práctica de remediación más común es el reemplazo de las instalaciones en mal estado por otras nuevas, lo cual es muy costoso. De acuerdo con Tomashov [1] más del 50% de las pérdidas por corrosión se deben a la corrosión atmosférica, por consiguiente es de vital importancia económica realizar estudios de corrosión atmosférica.



Figura 1. Mapa de ubicación del área del Lote X. En círculos de color blanco se señala la ubicación de las estaciones de estudio de corrosión atmosférica

El presente estudio ha sido realizado con el propósito de estudiar la corrosión atmosférica, medirla y categorizarla en diferentes áreas del Lote X de acuerdo a las pautas establecidas en la norma ISO 9223 (2). A partir de los resultados que se obtengan, PETROBRAS ENERGIA PERU S.A. establecerá una Política de Control de corrosión atmosférica que asegure la integridad mecánica de las instalaciones de recolección de fluidos, transporte y almacenamiento y acorde con las políticas de conservaciones del medio ambiente y seguridad laboral.

Formulación del problema

Los programas anuales de mantenimiento por corrosión atmosférica de PETROBRAS Energía Perú S.A. usualmente consideran el reemplazo de secciones de ductos cuando su espesor de pared remanente es inferior al espesor mínimo permitido o cuando reportan huecos pasantes por corrosión

atmosférica. Esto último ocurre únicamente en instalaciones cercanas al mar y expuestas a la brisa marina, tal como se aprecia en las figuras 2 y 3.



Figura 2. Tuberías construidas con acero API 5L Grado B, cercanas al mar. Exteriormente se muestran afectadas severamente por corrosión marina.



Figura 3. Tuberías construidas con acero API 5L Grado B, cercanas al mar. Exteriormente se muestran afectadas severamente por corrosión marina.

En áreas alejadas del mar y de menor humedad ambiental la corrosión atmosférica tiene mucho menor impacto, tal como se aprecia en las figuras 4 y 5. La velocidad de penetración de las picaduras en estas 2 últimas tuberías es $8,3 \mu\text{m/año}$ y $0,29 \mu\text{m/año}$, respectivamente.



Figura 4. Tubería instalada alejada a 4 400 metros del mar con una antigüedad de 31 años.



Figura 5. Tubería instalada alejada a 11 200 metros del mar con una antigüedad de 31 años.

PETROBRAS Energía Perú S.A. para sus ductos, utiliza tuberías de acero al carbono de acuerdo a la norma API 5L Grado B (4). Los ductos son instalados sobre el suelo mediante el uso de soportes tipo H, fabricados con acero J55 o

N80. El acero utilizado por PETROBRAS Energía Perú S.A. para construir tanques y separadores gas/liquido, es el acero ASTM A36.

Estudios previos han permitido medir la velocidad de corrosión por ultrasonido, mostrados en la tabla 1, en diversas instalaciones metálicas de diferente antigüedad y diferentes distancias al mar.

Tabla 1. Velocidad de corrosión medida por ultrasonido en ductos de diferentes tiempos de servicio. Las mediciones han sido realizadas de acuerdo a API 570 3rd Ed. Nov. 2009: Piping Inspection Code- In-service Inspection, Rating, Repair, and Alteration of Piping Systems (5).

Descripción del ducto	Distancia al Mar, m	Longitud m	Diámetro (pulg.)	Espesor Nominal (pulg.)	Espesor actual (pulg.)	Perdida de espesor (pulg.)	Año de instalación	Antigüedad (años)	Fecha de medición	Velocidad de Corrosión a la fecha de medición $\mu\text{m/año}$
LA07 a ELA06	6 150	3 077	4"	0,237	0,222	0,015	1 975	37	Mayo 2012	0,010
CA20 a ECA 22	11 000	4 209	6"	0,280	0,260	0,020	1 980	32	Mayo 2012	0,016
CA20 a ECA 20	11 500	2 621	8"	0,322	0,314	0,008	1 980	32	Mayo 2012	0,006
ZA-01a INTERSECCION ITEM 14	6 900	3 473	8"	0,322	0,311	0,011	2 005	7	Mayo 2012	0,040
MC JOINT POINT a ETA 28	4 190	776	10	0,365	0,304	0,061	1 993	19	Mayo 2012	0,082
OR11 a M.C.JOINT POINT	4 190	3 093	8"	0,322	0,317	0,005	2 006	6	Mayo 2012	0,021

Justificación teórica

El interés teórico de este estudio radica en la necesidad de cuantificar la corrosión atmosférica sobre los tipos de acero AISI/SAE 1020 y ASTM A36, identificar los productos de corrosión y encontrar expresiones matemáticas que relacionen la velocidad atmosférica con el tiempo, cloruros y humedad.

Para asegurar el éxito del estudio se ha recurrido al uso de técnicas e instrumentos disponibles en laboratorios locales de reconocido prestigio.

Para brindar universalidad a los resultados de este estudio hemos recurrido al uso de procedimientos de análisis propuestos por Instituciones como ISO,

ASTM, API y Decretos Supremos de Control de Calidad Ambiental. Los resultados de la velocidad de corrosión fueron mapeados para facilitar su correlación en el Lote X.

Justificación práctica

La justificación práctica de este estudio de tesis consiste en estudiar la corrosión atmosférica sobre dos tipos de acero de uso común en el Lote X (AISI/SAE 1020 y ASTM A36), de acuerdo con la norma ISO 9223 (2), con el propósito de seleccionar el material más resistente a la corrosión atmosférica, categorizar y mapear la corrosión en diferentes ubicaciones y elaborar programas de monitoreo y mitigación de la corrosión atmosférica, que garanticen a la empresa petrolera asegurar la excelencia en seguridad, medio ambiente y salud, reconociendo la importancia de garantizar de modo permanente la integridad de sus instalaciones.

Objetivos

Los objetivos generales y específicos se indican a continuación:

Objetivo general

Estudiar la corrosión atmosférica, sobre dos tipos de acero (AISI/SAE 1020 y ASTM A36) utilizados en la construcción de facilidades de producción, recolección y transporte de petróleo, en diferentes ambientes del Lote X, con el fin de identificar aspectos que la impactan.

Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este trabajo de tesis son los que a continuación enumeramos:

- a) Estudiar la corrosión en diferentes ambientes atmosféricos y formular ecuaciones que permitan su estimación en función del tiempo.
- b) Identificar productos de corrosión y variables que influyen en el proceso corrosivo atmosférico.
- c) Mapear la corrosión atmosférica en el Lote X.

2. MARCO TEÓRICO

Bases teóricas

La National Association of Corrosion Engineering (6), define la corrosión como un proceso natural de deterioro de los materiales a causa de su interacción con su medio ambiente.

La corrosión atmosférica es un proceso electroquímico y por consiguiente tres son los componentes que la constituyen, el metal que se corroe, el agente corrosivo y el electrolito. Se considera que para que este proceso electroquímico ocurra, debe formarse una muy delgada capa de electrolito en la superficie metálica. S. Syed (7) indica que esta capa se forma cuando se ha alcanzado una humedad crítica. J. Santana (8) reporta que la humedad crítica no es una constante y que varía de acuerdo a diferentes variables, por ejemplo: rugosidad de la superficie del metal que se corroe, capacidad de adsorción de humedad de los productos de corrosión y de los sólidos polucionantes que se depositan en la superficie.

En presencia de la película de electrolito, procede la reacción electroquímica y se postula las siguientes reacciones:

Reacciones anódicas: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$



Reacción catódica: $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$

La reacción catódica representa la reducción de oxígeno atmosférico y ocurre en electrolitos neutros o a pH cercano a 7.

Si asumimos que la película de electrolito es muy delgada y neutra e inclusive ligeramente ácida la reacción de generación de H_2 , $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$, es despreciable para muchos metales y aleaciones. Los estudios de difusión de oxígeno en la película de electrolito muestran que la reacción catódica no gobierna la reacción de corrosión, pero si, la reacción anódica. Así mismo, la formación de los productos de corrosión, la solubilidad de productos de

corrosión en el electrolito y la formación de películas pasivas afectan la velocidad del proceso de disolución anódica del metal. Respecto a esto último, es también importante señalar que la adherencia de la película pasiva es mayor cuanto más delgada es y esto genera alta protección. S. Syed concluye que el ataque corrosivo atmosférico en una superficie tiende a ser de tipo localizado. (7).

La reacción general de corrosión podemos expresarla de la siguiente forma:

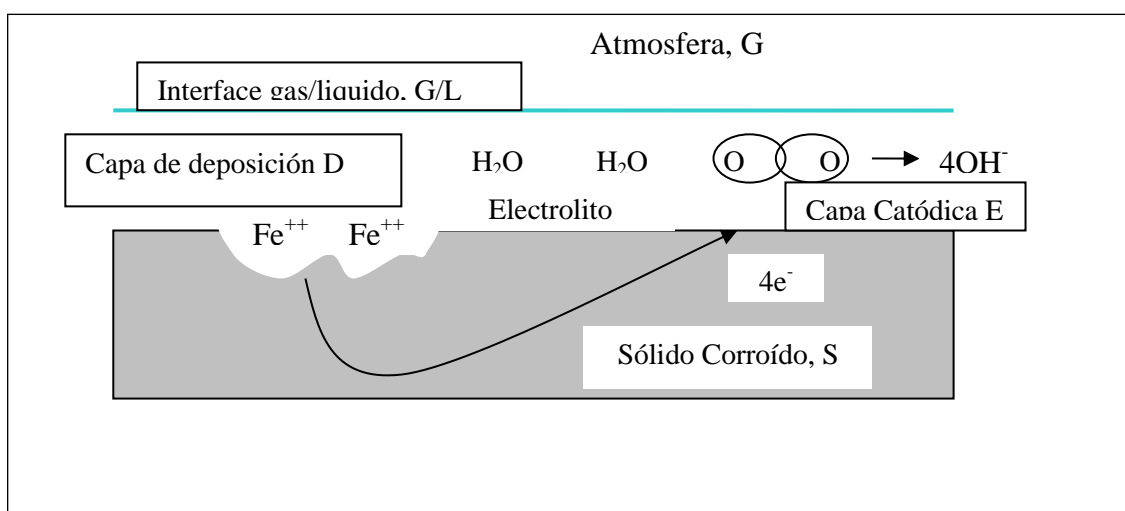


Figura 6. Esquema que muestra la idealización del proceso de corrosión atmosférico sobre una superficie de acero.

Para explicar la formación de productos, han sido propuestas diversas secuencias de reacción relativamente complejas. En este sentido, el modelo más apropiado para explicar la corrosión atmosférica bajo condiciones de humedecimiento y secado alternado, es el modelo cinético presentado por Graedel (9), el cual está basado en la formulación de seis diferentes regímenes. Los regímenes en este modelo llamado tipo GILDES ocurren en: la región gaseosa (G), la interface gas – líquido (I), superficie líquida (L), la capa de deposición (D), la capa catódica o electródica (E) y el sólido que se corroe (S).

La cinética de la reacción es muy importante en los fenómenos que ocurren en la capa gaseosa, aquí ocurren fenómenos de ingreso y escape de especies a la interface líquida, efectos de radiación solar en las reacciones atmosféricas

foto sensitivas y afectaciones de la fase gaseosa por cambios de temperatura. En la interface gas – líquido, ocurre la transferencia de moléculas al interior de la capa líquida, la fase líquida recibe especies de la fase gaseosa y otras disueltas se volatilizan hacia la fase gaseosa. El espesor de la película influye en la concentración de las especies, en las transformaciones químicas en el líquido y en reacciones que involucran iones metálicos, originados a partir de reacciones de corrosión electroquímica. En la zona de deposición los productos de corrosión se acumulan tras su nucleación sobre la superficie del metal. Los productos de corrosión formados bajo condiciones de una película muy delgada a condiciones atmosféricas, están estrechamente relacionados con sus formas minerales tal como ocurren en la naturaleza. Con el transcurrir del tiempo las especies termodinámicamente más estables tenderán a ser las más abundantes.

Cabe mencionar que la solución del electrolito puede quedar atrapada en el interior o bajo los productos de corrosión, esto dependerá de la resistencia al transporte iónico de las capas de productos de corrosión. Cualquier superficie corroyéndose tiene una compleja distribución de carga, produciendo en el electrolito adyacente una capa microscópica con propiedades físico químicas que difieren del electrolito. Este régimen electródico influye la cinética de la reacción. En el régimen sólido, son relevantes las etapas de disolución del sólido y sus características cinéticas. Las películas pasivantes tienden a constituir fuertes barreras al transporte iónico.

En la tabla 2, mostramos la naturaleza de los productos de corrosión encontrados en diferentes metales expuestos a la atmósfera, Handbook of Corrosion Engineering (10), sin embargo esto no es absoluto.

Tabla 2. Naturaleza de productos de corrosión atmosférica formada en cuatro metales. Roberge P.R.1999.Handbook of Corrosion Engineering.

Metal	Especies comunes	Especies raras
Al	Al(OH) ₃ Al ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	AlOOH, Al _x (OH) _y (SO ₄) _z AlCl(OH) ₂ ·4H ₂ O
Fe	Fe ₂ O ₃ , FeOOH, FeSO ₄ ·4H ₂ O	Fe _x (OH) _y Cl _z , FeCO ₃
Cu	Cu ₂ O, Cu ₄ SO ₄ (OH) ₆ Cu ₄ SO ₄ (OH) ₆ ·2H ₂ O Cu ₃ SO ₄ (OH) ₄	Cu ₂ Cl(OH) ₃ , Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂ Cu ₂ NO ₃ (OH) ₃
Zn	ZnO, Zn ₅ (OH) ₆ (CO ₃) ₂ ZnCO ₃	Zn(OH) ₂ , ZnSO ₄ , Zn ₅ Cl ₂ (OH) ₈ ·H ₂ O

De acuerdo al presente estudio, la corrosión atmosférica, en el Lote X, se presenta básicamente como corrosión bajo depósitos, muy influenciada por los cloruros, humedad y velocidad del viento. Estudios realizados por R. Pizarro (13), Eusebio Dionicio (18) y Daisy Gonzáles (19) en Lima y Moquegua – Tacna, respectivamente, revelan semejantes conclusiones. La polución por H₂S, SO_x y NO_x en el aire no impacta los fenómenos de corrosión atmosférica en el Lote X, pues su concentración, es muy baja.

Tipos de corrosión

Corrosión industrial

La polución de un ambiente industrial se caracteriza por estar compuesta principalmente de compuestos de azufre, tal como dióxido de azufre (SO₂), precursor de la lluvia ácida, y los óxidos de nitrógeno (NO_x). El dióxido de azufre es adsorbido por las partículas de polvo y oxidado bajo condiciones

húmedas para formar ácido sulfúrico por un proceso catalizado por las partículas de polvo. El ácido sulfúrico así formado toma la forma de microscópicas gotitas y cae como lluvia (25).

Corrosión marina

Un ambiente marino está cargado de partículas de niebla, que contiene sales disueltas. Estas finas partículas de humedad son transportadas por el viento y se depositan en las superficies expuestas. Bajo ciertas condiciones de temperatura estas sales se cristalizan. La cantidad de sal depositada variara con la velocidad del viento y en condiciones climáticas extremas puede formar una costra de sal muy corrosiva.

La cantidad de contaminación disminuye en la medida que nos alejamos del mar y se ve muy afectada por las corrientes de viento, temperatura ambiental y humedad.

Corrosión rural

Los ambientes rurales son los más benignos y no contienen contaminantes químicos fuertes. Los ambientes áridos o tropicales son variaciones especiales del ambiente rural. En los climas áridos no llueve pero puede ocurrir ocasionalmente, una humedad relativa alta y condensación. Este es el tipo de clima que predomina en el Lote X, en el cual anualmente llueve los meses de verano debido a la corriente del Niño.

En los trópicos, además de la temperatura alta promedio, el ciclo diario incluye una humedad relativa alta, el sol es intenso y los periodos de condensación son largos durante la noche y ocurrencia muy frecuente de lluvia. En áreas protegidas por colinas, la humedad de la condensación puede persistir mucho tiempo después del amanecer. Tales condiciones pueden producir un ambiente altamente corrosivo.

Corrosión en interiores

Las atmósferas interiores normales se consideran generalmente de muy baja corrosividad cuando la humedad y los contaminantes están bajo control. Sin

embargo, algunas combinaciones de condiciones pueden causar problemas de corrosión relativamente severas.

Factores que afectan la corrosión atmosférica

Siendo la corrosión un proceso electroquímico, es necesaria la presencia de los tres elementos que la constituyen, el metal que se corroe, los agentes corrosivos y el electrolito, la ausencia de alguno de ellos implica su no ocurrencia. En este sentido el agente corrosivo naturalmente presente en la atmosfera es el oxígeno.

A partir de esta concepción, postulamos que los factores atmosféricos que afectan la corrosión de los metales son la humedad, Cloruros, temperatura, precipitaciones, radiación solar y velocidad de viento. También esperamos que gases contaminantes impacten la velocidad de corrosión, como el dióxido de azufre, dióxido de carbono, sulfuro de hidrogeno y óxidos de nitrógeno, entre otros.

Humedad

El factor más importante de la corrosión atmosférica, es la humedad sea en forma de lluvia, rocío, condensación o alta humedad relativa. En ausencia de humedad, la mayoría de los contaminantes tienen poco o ningún efecto sobre la corrosión. La lluvia tiene un efecto beneficioso sobre la corrosión debido a que es capaz de lavar la superficie metálica. Sin embargo, si la lluvia se acumula en zonas que inducen estancamiento del agua puede acelerar la corrosión mediante el suministro continuo de humedad.

La humedad provee el electrolito para que la corrosión atmosférica ocurra. El electrolito está constituido de una película muy delgada o de una película acuosa cuando el metal aparece perceptiblemente mojado. Se ha demostrado que la humedad relativa (HR) ejerce un papel decisivo en la corrosión atmosférica. Por debajo de un determinado nivel de HR la corrosión es insignificante, pues no existe película apreciable de electrólito sobre el metal. Un espesor mínimo de 5 a 10 mono capas es necesario para que la película de agua permita que ocurra la reacción electroquímica en la superficie del

metal. La humedad crítica no es una constante, varía de acuerdo a diferentes factores, por ejemplo: rugosidad de la superficie del metal que se corroe, capacidad de adsorción de humedad de los productos de corrosión y de los sólidos polucionantes que se depositan en la superficie (09).

Generalmente, la corrosión del hierro y otros metales es despreciable a humedades relativas por debajo del 60-80 %, dependiendo del metal. S. Rivero (11) comenta que aun cuando la HR exceda este nivel, para que la velocidad de corrosión sea realmente importante, la atmósfera debe estar contaminada con especies iónicas disueltas.

Temperatura

La temperatura del aire ocasiona efectos antagónicos en la corrosión atmosférica. Por un lado, hay que considerar que un aumento de la temperatura acelera la velocidad de los diversos procesos físicos y químicos involucrados en la corrosión metálica: reacciones químicas y electroquímicas y procesos de difusión. Sin embargo, un aumento de la temperatura también conduce a velocidades más altas de volatilización de la película acuosa, reduciendo, por tanto, el tiempo de humectación de la superficie metálica. Un aumento de la temperatura reduce, asimismo, la solubilidad de los gases en la película de humedad y, por tanto, del contenido de oxígeno disuelto, fundamental para el desarrollo del proceso catódico en el mecanismo de corrosión electroquímica de los metales en la atmósfera. El efecto resultante de un aumento de la temperatura suele ser un incremento de la velocidad de corrosión bajo condiciones de humectación permanente de la superficie metálica, tales como las que ocurren durante la precipitación. Sin embargo, bajo condiciones de humectación variable, la velocidad de corrosión aumenta con la temperatura hasta un cierto valor máximo y, posteriormente, decrece.

Salinidad ambiental

Son diversas las fuentes que motivan la presencia de cloruros en la atmósfera, siendo la actividad industrial (origen antropogénico) y el agua de mar (origen natural) las más importantes.

S. Rivero (11), reporta que el depósito de partículas salinas sobre la superficie metálica acelera la corrosión, sobre todo si, como en el caso de los cloruros, pueden dar lugar a productos de corrosión solubles en lugar de los escasamente solubles que se forman en agua pura. Por otro lado, los cloruros, disueltos en la capa de humedad, elevan considerablemente la conductividad de la película del electrólito sobre el metal y colaboran en la desestabilización de eventuales películas pasivantes.

Para que el ion cloruro acelere la corrosión es necesario que la superficie metálica esté humedecida. El valor de HR, a partir del cual la sal comienza a absorber agua de la atmósfera (higroscopicidad), parece ser crítico desde el punto de vista de la corrosión. Rivero y Chico (11) refieren que Ambler y Bain comprobaron que la humedad del 78 %, que es la de equilibrio con una solución saturada de NaCl, coincidía con una fuerte aceleración de la corrosión del acero al carbono.

La salinidad de las atmósferas marinas varía dentro de muy amplios límites, desde valores extremos, en áreas de aguas muy agitadas (rompientes), a valores bajos en zonas de agua de mar en calma. Entre las variables con influencia en la salinidad atmosférica destacan el régimen de vientos dominantes (dirección y velocidad), distancia a la costa, topografía de la zona, altitud, densidad rocosa costera, morfología de las olas, temperatura del agua de mar, etc.

Rivero y Chico (11) muestran que la relación existente entre salinidad y corrosión metálica en un ambiente marino polar es lineal en un amplio intervalo (0-500 mg $\text{Cl}^-/\text{m}^2\cdot\text{d}$) de concentraciones de ion cloruro. Por encima de 500 mg $\text{Cl}^-/\text{m}^2\cdot\text{d}$, la corrosión aumenta, sólo ligeramente, frente a incrementos de la salinidad atmosférica, llegando a estabilizarse.

Yuantai Ma (14) y C. Rémaizeilles, Ph. Refait (28) reportan que en condiciones de alta cantidad de Cl^- , encima de un valor crítico, la existencia de Cl^- conduce a la formación de $\beta\text{-FeOOH}$, Akaganeita, la cual deteriora la resistencia del acero de bajo carbono.

Bajo condiciones húmedas, Yuantai (14) postula las siguientes reacciones:

Reacción Anódica: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$



Reacción Catódica: $\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$

Reacción Total: $(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}) + 2\text{Cl}^- + \text{OH}^- \rightarrow \text{FeOCl} + \text{HCl}$

Bajo condiciones de clima seco: $\text{FeOCl} \rightarrow \beta\text{-FeOOH}$

En ambientes de bajo contenido de Cl^- , el Cl^- facilita la transformación de $\gamma\text{-FeOOH}$ (Lepidocrocita) a $\alpha\text{-FeOOH}$ (Goethita). El proceso completo es mostrado a continuación

$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ (disolución) $\rightarrow \text{FeOH}^+$ (Hidrólisis) $\rightarrow \gamma\text{-FeOOH}$ (oxidación y precipitación) $\rightarrow \text{FeO}_x(\text{OH})_{2-2x}\text{Cl}$ (clorinación y precipitación) $\rightarrow \alpha\text{-FeOOH} + \text{HCl}$ (precipitación)

Origen de la salinidad en ambiente marino.

Las olas se producen por la transferencia de energía del viento al mar y se originan en espacios denominados “zonas de generación” asociadas, por lo general, a fuertes vientos y tormentas. S. Rivero (11) reporta que la altura de las olas depende no solamente de la velocidad del viento sino, también, del tamaño de la zona de generación a través de la cual sopla el viento y del número de horas en que el viento está soplando (persistencia), así como del estado previo de la mar (condiciones iniciales).

La descarga de energía cinética (rompiente) de las olas es una contribución importante a la formación de aerosol marino. La agitación y la turbulencia asociadas a ello arrastran aire que forma burbujas debajo de la superficie del agua. Cuando estas burbujas se liberan al aire, estallan al entrar en contacto con la atmósfera, produciendo finas gotas salinas que dan lugar a una suspensión de solución de agua de mar en aire, conocida como aerosol Marino. Este mecanismo es importante en la generación de partículas salinas en la atmósfera, a velocidades de viento bajas e intermedias. Mar adentro, cuando el mismo comienza a agitarse por la acción del viento, se forma

pequeñas islas de espuma, cuya densidad y abundancia depende de la intensidad del viento. A velocidades del viento superiores a 10 m/s, tiene lugar, en alta mar, la formación de una ola de altura considerable, que conlleva un barrido mecánico de sus crestas por la acción del fluir del viento, dando lugar a una formación secundaria de partículas salinas mediante la formación de espuma y producción de ciertas gotas de tamaño considerable, conocidas como “spray”.

Cuando las olas llegan a la costa por la propia dinámica de la onda marina, son inestables y descargan naturalmente su energía cinética rompiendo, una vez alcanzada la interface arena-agua-atmósfera, o bien impactan en los rompedores de olas, dando lugar, también, a la formación del aerosol marino, de diferente naturaleza en ambos casos.

La profundidad del mar en la zona costera influye enormemente en la existencia de rompientes que dan lugar a una producción elevada de salinidad. La magnitud del aerosol marino producido en alta mar está estrechamente ligada a la extensión de espuma que, a su vez, está relacionada con la latitud del lugar. En zonas costeras, conviene diferenciar el aerosol originado en los rompedores de olas como resultado de la acción de fuertes vientos del que se origina por la acción de bajas intensidades de vientos. En el primer caso, la intensidad del viento local tiene una notable influencia en el tamaño de las olas que rompen en la línea de costa, en tanto que, en el segundo, el estado del mar viene determinado, principalmente, por las olas generadas en zonas lejanas al rompiente.

La producción de aerosol marino en un rompiente depende de los vientos locales. Una estimación de la concentración de sal (S , $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) en el aire debida a este efecto viene dada por la expresión:

$$\ln S = 0,23 U_2 + 3,05 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde, U_2 es la velocidad del viento ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) a 2 m por encima del nivel del mar.

Depósitos de partículas aerosoles

El comportamiento de las partículas de aerosol en ambientes al aire libre puede explicarse invocando las leyes que rigen su formación, movimiento y captura.

Estas partículas rodean el planeta y su concentración dependerá de una multitud de factores, incluyendo la ubicación, tiempo del día, año, condiciones atmosféricas, presencia de fuentes locales, altitud, velocidad del viento. Las concentraciones más elevadas se encuentran generalmente en zonas urbanas, alcanzando 10⁸ a 10⁹ partículas por cm³ con tamaño de partículas en el rango de 100 μ m a unos cuantos nm.

El tamaño de partícula se utiliza normalmente para clasificar aerosoles, pues es la propiedad más fácilmente medida. La fracción más alta de masa de partículas en un aerosol se caracteriza por partículas que tienen un diámetro en el rango de 8 a 80 micras. Algunos estudios indican que existe una fuerte relación entre la velocidad de viento, la deposición y captura de los aerosoles.

Transporte de aerosol marino.

Las partículas de aerosol marino pueden ser arrastradas por los vientos marinos hacia el interior del continente, donde tienden a sedimentar después de cierto tiempo y después de haber recorrido una cierta distancia o bien a impactar y adherirse sobre superficies.

La salinidad se elimina de la atmósfera por depósito húmedo y depósito seco. La disminución de la concentración de partículas de aerosol marino en los primeros cientos de metros a partir de la línea de costa está causada, principalmente, por un proceso de depósito seco. Dos mecanismos son, básicamente, los responsables de ello: la sedimentación por efecto de la gravedad y la eliminación por impacto (fricción), a través del contacto de la masa de aire con la rugosidad del terreno. La velocidad del viento y la fricción tienen una influencia apreciable en la disminución de la salinidad, conforme se avanza terreno adentro. Las partículas mayores tienen una mayor velocidad de sedimentación por lo que, por lo general, no son transportadas a largas distancias.

En un estudio en ambiente marino, Rivero y Chico (11), realizaron una recopilación de información existente en la bibliografía sobre la disminución de la salinidad atmosférica en función de la distancia a la línea de costa. Los estudios realizados por Bardgett (12) en distintas partes del mundo mostraban, todos ellos, una rápida disminución de la salinidad en los primeros cientos de metros de la línea de costa, seguida de un decrecimiento más moderado, tendiendo a un valor asintótico que podría corresponder a los valores de fondo de salinidad atmosférica típicos de los distintos lugares donde se llevaron a cabo los estudios.

Existen distintas expresiones para describir este comportamiento. Johnson y Stanners (11) sugieren el siguiente modelo matemático de decrecimiento exponencial:

$$Y = C e^{-Ax} + D e^{-Bx} \text{ (Ecuación 2)}$$

donde, Y es el valor medio de salinidad ($\text{mg Cl}^-/\text{m}^2 \cdot \text{d}$) a una distancia de x metros de la línea de costa; A y B son constantes de decrecimiento; y C y D son los valores de salinidad a distancia cero (línea de costa), correspondientes a los dos tipos de partículas que contribuyen a la salinidad atmosférica: partículas sedimentables que se depositan rápidamente por la acción de la gravedad y partículas flotantes, de menor tamaño, que permanecen en el aire durante largo tiempo y que se van eliminando del aire turbulento por el contacto (fricción) con los obstáculos. El modelo de la ecuación (2) ofrece una razonable justificación física a las primeras observaciones de Ambler y Bain en Nigeria en uno de los primeros estudios realizados sobre esta temática, referidos por Rivero y Chico (11).

Rivero y Chico (11) refieren que para diferentes puntos de Australia, King y Carberry establecieron la siguiente relación hipérbolica

$$\ln \text{ corrosión} = A + B / (1 + Cx) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Siendo A, B y C constantes y x la distancia a la costa.

Rivero y Chico (11) también refieren que a partir de estudios realizados en distintas partes del mundo, Doyle y Godard apuntaban que la disminución de la corrosión con la distancia a la costa se ajustaba a una curva hiperbólica del tipo

$$X^{1/3} + Y^{1/3} = K \text{ (Ecuación 4)}$$

Donde, X es la distancia a la costa, Y es el índice de corrosión marina y K es una constante.

De acuerdo con Feliu la posibilidad de que las partículas de aerosol alcancen puntos más o menos distantes de la línea de costa, es el resultado de las dos tendencias predominantes: su arrastre hacia el interior por los vientos marinos y su depósito sobre el terreno por los dos mecanismos mencionados anteriormente.

Se apunta la siguiente expresión:

$$C = C_o \exp(-\beta x) + A \text{ (Ecuación 5)}$$

Donde, C es la velocidad de corrosión, Co es una constante (prácticamente coincide con el valor de la velocidad de corrosión en la línea de costa cuando $C_o \gg A$), β es una constante, x es la distancia a la costa y A es la velocidad de corrosión a salinidad cero.

Los datos experimentales disponibles no permitieron discernir entre la ecuación (5) y la ecuación del tipo:

$$C = C_o \exp(-\beta x) \text{ (Ecuación 6)}$$

Ecuación similar a la que obtuvieron para la variación de la salinidad con la distancia a la costa:

$$S = S_o \exp(-\alpha x) \text{ (Ecuación 7)}$$

Rivero y Chico (11) indican que de acuerdo con Cole la producción de aerosol marino es la suma de la producción en la zona de rompiente y la producción en el océano.. La concentración del aerosol generado en la zona de rompiente disminuye rápidamente en un kilómetro de la línea de costa, en tanto que el

aerosol generado en el océano puede ser transportado hacia el interior a distancias superiores a los 50 Km.

La variación de la concentración salina con la distancia a la línea de costa se puede estimar mediante un decrecimiento exponencial. Así, en el caso de la zona de rompiente:

$$A(d) = A_i [(0,9 e^{-d/0,1}) + (0,1 e^{-d})] \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde, A_i es la concentración salina en la línea de costa y $A(d)$ la concentración a una distancia d de la línea de costa. Para el aerosol producido en el océano:

$$O(d) = O_i \exp^{-d/x} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde, O_i y O_d son las concentraciones de aerosol en la línea de costa y a una distancia d de la línea de costa, respectivamente, y x es la constante de decaimiento.

Polución

El dióxido de azufre, producto de la combustión de hidrocarburos, carbono, gas natural, se ha convertido en uno de los gases contaminantes que contribuyen a la corrosión de metales.

Menos promotores de corrosión, son los óxidos de nitrógeno (NO_x) que también son productos de combustión. Una fuente importante de NO_x en zonas urbanas es la de los humos de escape de los vehículos.

El dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno (NO_x) y las partículas de aerosol pueden reaccionar para formar nuevas sustancias químicas que pueden ser transportadas como aerosoles.

El H_2S es un gas frecuente en los pozos del Lote X, sin embargo debido a las precauciones para evitar sus fugas a la atmósfera su presencia en el aire es muy baja y en muchos casos no es detectada.

Sólidos circundantes acarreados por el viento

El transporte de partículas por el viento es causa de que estos sólidos se depositen en las superficies mecánicas. Su capacidad de absorción de humedad, adherencia a la superficie y capacidad de aglomeración con otras partículas influye en diferentes grados sobre la corrosión llamada bajo depósito. Aunque esto no se menciona en la literatura, quizás por omisión, en este estudio se muestra notablemente su efecto.

La diversidad de los contaminantes y su sinergia hacen que la predicción y extrapolación de resultados de la corrosión atmosférica sea difícil. (8).

Medición de factores que afectan la corrosión atmosférica

Diversos métodos han sido desarrollados para medir los factores que influyen en la corrosión atmosférica. La norma ISO 9223 (2) lista métodos que han sido utilizados en este trabajo de tesis. Estos métodos consideran medir, la cantidad y composición de los contaminantes en la atmosfera y su variación de estos con el tiempo, la temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, radiación solar y la cantidad de precipitación, tiempo de permanencia de la humedad, cantidad de dióxido de azufre, cloruros.

Tiempo de humectación

El tiempo de humectación es un parámetro estimado que se basa en determinar el tiempo en el que la humedad relativa es mayor que 80% a una temperatura mayor a 0°C. Puede expresarse en horas, días por año o el porcentaje anual de tiempo.

La clasificación del tiempo de humectación esta dado en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de Tiempo de Humectación según ISO 9223 (2).

Categoría	Tiempo de Humectación		Ejemplo de ocurrencia
	Horas/ año	%	
t_1	$t \leq 10$	$t \leq 0,1$	Microclimas interiores con control climático
t_2	$10 < t \leq 250$	$0,1 < t \leq 3$	Microclimas de interiores sin control climático
t_3	$250 < t \leq 2500$	$3 < t \leq 30$	Atmósferas exteriores en climas secos y fríos, climas fríos y parte de climas templados, cobertizos apropiadamente ventilados en climas templados.
t_4	$2500 < t \leq 5500$	$30 < t \leq 60$	Ambientes al aire libre en todos los climas (excepto en los climas secos y fríos), cobertizos ventilados en condiciones húmedas, cobertizos sin ventilación en climas templados
t_5	$5500 < t$	$60 < t$	Parte de los climas húmedos, cobertizos ventilados en condiciones húmedas

Polución

El dióxido de azufre es medido en términos de su concentración en el aire en unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Existen métodos muy precisos para esta determinación pero su efecto sobre la corrosión es solo referencial, por cuanto lo que interesa conocer es cuanto dióxido de azufre hidratado o trióxido de azufre toma contacto con la superficie.

Puesto que es el SO_2 depositado sobre la superficie del metal el que afecta la corrosión, frecuentemente también se mide la velocidad de deposición sobre la superficie en unidades de $\text{mg/m}^2/\text{día}$. Los niveles de contaminación también se pueden medir en términos de la concentración del sulfato disuelto en el agua de lluvia.

Tabla 4. Clasificación de polución por contenido de sustancias sulfuradas representadas por SO_2 . El método de determinación de azufre está en el ISO 9223 (3).

Velocidad de deposición de SO_2 $\text{mg/m}^2.\text{d}$	Concentración de SO_2 $\mu\text{g/m}^3$	Categoría
$P_d \leq 10$	$P_c \leq 12$	P_0
$10 < P_d \leq 35$	$12 < P_c \leq 40$	P_1
$35 < P_d \leq 80$	$40 < P_c \leq 90$	P_2
$80 < P_d \leq 200$	$90 < P_c \leq 250$	P_3

Cloruros

La salinidad del aire se refiere al contenido de sal suspendida en la atmosfera. Se mide por la concentración en el aire en unidades de g/m^3 , también se mide en $\text{mg/m}^2/\text{año}$. La sal que se deposita sobre la superficie de metal afecta la corrosión. Los niveles de cloruro en la atmosfera también se pueden medir en términos de la concentración de sal disuelta en el agua de lluvia.

El método de la vela, es muy común para la determinación de cloruros.

Tabla 5. Clasificación de polución del aire por el contenido de cloruros, ISO 9223 (2).

Velocidad de deposición de Cloruros $\text{mg}/(\text{m}^2.\text{d})$	Categoría
$S \leq 3$	So
$3 < S \leq 60$	S1
$60 < S \leq 300$	S2
$300 < S \leq 1500$	S3

El ion cloruro es uno de los más significantes contaminantes naturales en ambientes marinos, juega un papel importante en el proceso corrosivo de estructuras de acero. Yuntuai Ma (14) estudio el impacto de diferentes contenidos de cloruros sobre la corrosión atmosférica.

Probetas (cupones) de corrosión atmosférica, ISSO 9223 (2)

La manera más común de medir directamente la corrosión es por exposición a la atmosfera de probetas de metales desnudos. Las probetas expuestas son retiradas y se mide la velocidad de corrosión por la pérdida de peso en el tiempo de exposición. Las probetas son también sometidas a otros tipos de análisis como los que hemos realizado en este estudio.

Categorización de la corrosión atmosférica

La Organización Internacional de Normalización (ISO) puso en marcha un programa mundial de exposición atmosférica conocida como ISO CORRAG, desde 1986 a 1998. Este programa incluyo la exposición de probetas de acero, cobre, zinc por 1, 2, 4 y 8 años en 51 lugares de 14 naciones con el fin de

generar los datos necesarios para producir un sistema de clasificación que permita predecir la corrosión atmosférica.

El programa consto de 6 a un año de exposición. Las probetas utilizadas fueron planas y de las siguientes dimensiones 100 x 150 x 2 mm también utilizaron especímenes de forma helicoidal. Las probetas fueron retiradas en triplicado, cada 6 meses durante 3 años. Utilizaron 3 probetas para brindar reproducibilidad. Los metales seleccionados fueron de acero de bajo carbono y adquirido a un solo proveedor. Las probetas de zinc, cobre y aluminio fueron comercialmente puras y adquiridas localmente en las Naciones participantes. Al término de cada exposición las probetas fueron retiradas y enviadas al Laboratorio que había efectuado la pesada inicial, para limpiarlas, pesarlas y evaluarlas.

Las pérdidas de peso se convirtieron a valores de espesor perdido por corrosión. Basados en estos datos se estableció 5 clases de corrosividad para cada metal.

El estándar originado por este estudio es el ISO 9223 y no está destinado a condiciones de servicio extremas, tales como los que están dentro de instalaciones de fabricación de productos químicos o instalaciones metalúrgicas o en ambientes contaminados con sales pulverizadas. Las categorías de corrosividad están indicadas en la tabla 1, extraída de la norma ISO 9223.

Tabla 6. Categorías de corrosividad de acero al carbono y su respectivo rango de velocidad de corrosión de, r_{corr} , para el primer año de exposición. ISO 9223.

Categoría de Corrosividad	Velocidad de corrosión, r_{corr}, $\mu\text{m/año}$
C1	$r_{\text{corr}} \leq 1.3$
C2	$1.3 < r_{\text{corr}} \leq 25$
C3	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$
C4	$50 < r_{\text{corr}} \leq 80$
C5	$80 < r_{\text{corr}} \leq 200$

Mapas de corrosividad

El mapa de corrosividad es una forma sencilla y eficaz de comunicar las características generales de corrosividad atmosférica en diferentes puntos geográficos. Estos mapas son herramientas importantes para estimar tendencias corrosivas, seleccionar rápidamente técnicas de mitigación y monitoreo de la corrosión atmosférica.

Elaborar mapas de corrosividad no es fácil ni rápido ya que depende de un gran número de factores como los climatológicos y contaminantes. Existen varias formas de hacer estos mapas, una de ellas es mediante la obtención de datos de corrosividad atmosférica analizando el efecto causado en distintos metales expuestos en diferentes áreas geográficas.

3. METODOLOGÍA

Para medir la velocidad de corrosión atmosférica se utilizaron probetas de acero AISI/SAE 1020 para medir su pérdida de peso después de un periodo de exposición atmosférico de un año y probetas de acero ASTM A 36 para un periodo de exposición de dos años. El procedimiento de ejecución ha sido desarrollado de acuerdo a lo indicado en la norma ISO 9223 -1992 "Corrosión of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification" (2).

La velocidad de corrosión fue calculada mediante la siguiente Ecuación

$$\text{Velocidad de corrosión } (\mu\text{m/año}) = (\text{Pérdida de peso, g} \times 3,65 \times 10^6) / (\text{Área de la Probeta, cm}^2 \times \text{Tiempo de Exposición, días} \times \text{densidad del metal, g/cm}^3)$$

(Ecuación 10)

Para nuestros cálculos hemos considerado la densidad del acero en 7.85 g/cc

Las aleaciones ensayadas han sido caracterizadas mediante difracción de rayos X y microscopia electrónica (Microscopio Marca Tescan con detector de rayos X Brucker modelo Quantax X - Flash 5010, del Laboratorio BISA).

Los productos de corrosión han sido analizados por difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X (Shimadzu modelo XRD 2000 del Laboratorio INGEMMET) y microscopia electrónica.

La profundidad promedio de las picaduras en las probetas después de su exposición ha sido medida con un Elcometer 123 Profile Gauge Analog. A partir de esta medición hemos calculado la velocidad de penetración de la picadura, según la siguiente Ecuación.

$$\text{Velocidad de penetración de picadura } (\mu\text{m/año}) = (\text{Profundidad de picadura } (\mu\text{m})) / ((\text{Tiempo de exposición, días} \times (1 \text{ año} / 365 \text{ días})) \text{ (Ecuación 11)})$$

Hemos analizado el contenido de cloruros en la atmosfera, humedad relativa, polución del aire y la velocidad del viento, con el objetivo de determinar su impacto sobre la corrosión atmosférica en el área del Lote X,

Las estaciones de estudio estuvieron ubicadas en diez lugares representativos del Lote X, siendo los criterios de selección, su cercanía al mar, presencia de accidentes geográficos que permitan establecer diferencias entre ubicaciones favorablemente y no favorablemente expuestas a la brisa marina. Otros criterios de estudio fueron la altitud y cercanía a instalaciones industriales importantes en el área operada por PETROBRAS Energía Perú S.A.

Determinación de la velocidad de corrosión atmosférica en probetas de acero AISI/SAE1020 y ASTM A36

La velocidad de corrosión fue determinada promediando la pérdida de peso de 3 probetas expuestas en un tiempo pre establecido y de acuerdo a la norma ISO 9223 (2). Las probetas antes de ser instaladas fueron limpiadas inicialmente con acetona y seguidamente limpiadas con solución ácida según lo descrito en la norma ISO/DIS 8407-1991 “Metals and Alloys – Procedure for removal of corrosion products from corrosion test specimens” (15). Ver Anexo 8. Similar procedimiento de limpieza fue utilizado para limpiar las probetas después de su exposición. El pesado inicial y final fue efectuado en una balanza analítica de 0,1 mg de precisión para probetas de acero AISI/SAE 1020 de 1 mm de espesor y 0,01 g de precisión para las probetas de acero ASTM A36, de 3mm de espesor.

Tipo de probetas y dimensiones.

Por cada estación fueron instaladas 15 probetas planas de acero AISI/SAE 1020 y 12 probetas planas de acero ASTM A36.

Las dimensiones de las probetas de acero AISI/SAE 1020 fueron 150 x 100 x 1 mm y para las probetas de acero ASTM A36, 150 x 100 x 3 mm.

Tiempo de exposición

Las probetas de Acero AISI /SAE 1020 fueron retirados en triplicado a los 50, 120, 189, 280 y 395 días de exposición.

Las probetas fabricadas con acero ASTM A36, fueron retiradas en triplicado a los 395 y 721 días de exposición.

Instalación

Las probetas fueron instaladas en bastidores tal como se aprecia en la figura 7.

Las características de los bastidores son las siguientes:

- ✓ Inclinación: 45 grados.
- ✓ Orientación de la ubicación: dirección al mar.
- ✓ Altura sobre el piso: 1 metro.
- ✓ Material de fabricación: Madera Tornillo preservada y protegida con barniz marino. Uniones de los distintos elementos fueron pegados con "cola" y clavos de acero. Para la fijación de las probetas de ensayo se utilizaran fijadores plásticos, los cuales fueron unidos a la superficie de madera mediante clavos de acero, protegiendo la cabeza del clavo con esmalte anticorrosivo.

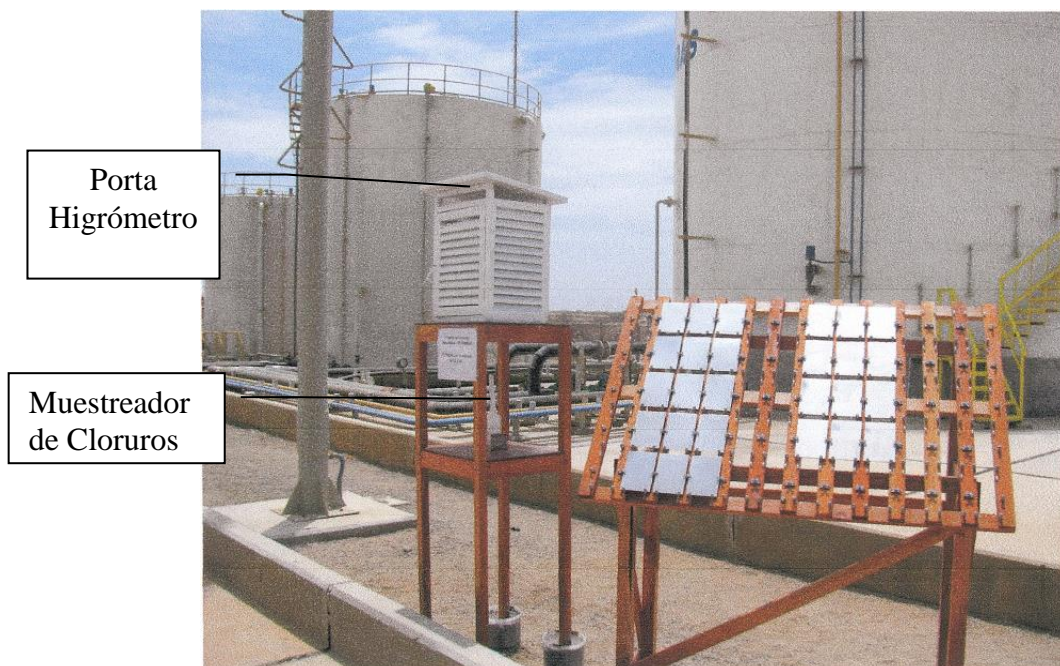


Figura 7. Bastidor instalado en la estación E9 – estación 951. Podemos apreciar el bastidor porta probetas, el equipo para determinar cloruros y el porta higrómetro.

Estaciones de estudio

Diez ubicaciones fueron seleccionadas para instalar las estaciones de estudio. Los criterios de selección fueron los siguientes:

- ✓ Distancia a la línea de playa;
- ✓ Exposición a la brisa marina,
- ✓ Altitud;
- ✓ Potencial polución en instalaciones industriales de mayor importancia.

Tabla 7. Estaciones de estudio, su distancia a la línea de playa y altitud.

Nombre de estación	Distancia de la línea de playa (m)	Altitud (m)
E1 Batería PN 33	822	91
E2 Batería PN 32	586	26
E3 Batería OR 11	2 738	20
E4 Batería BA 35	4 650	297
E5 Batería PN 30	820	41
E6 Estación PTC	5 900	178
E7 Batería LA 08	5 530	296
E8 Batería LA 07	7 000	296
E9 Estación 951	6 975	279
E10 Batería ZA 03	10 022	270

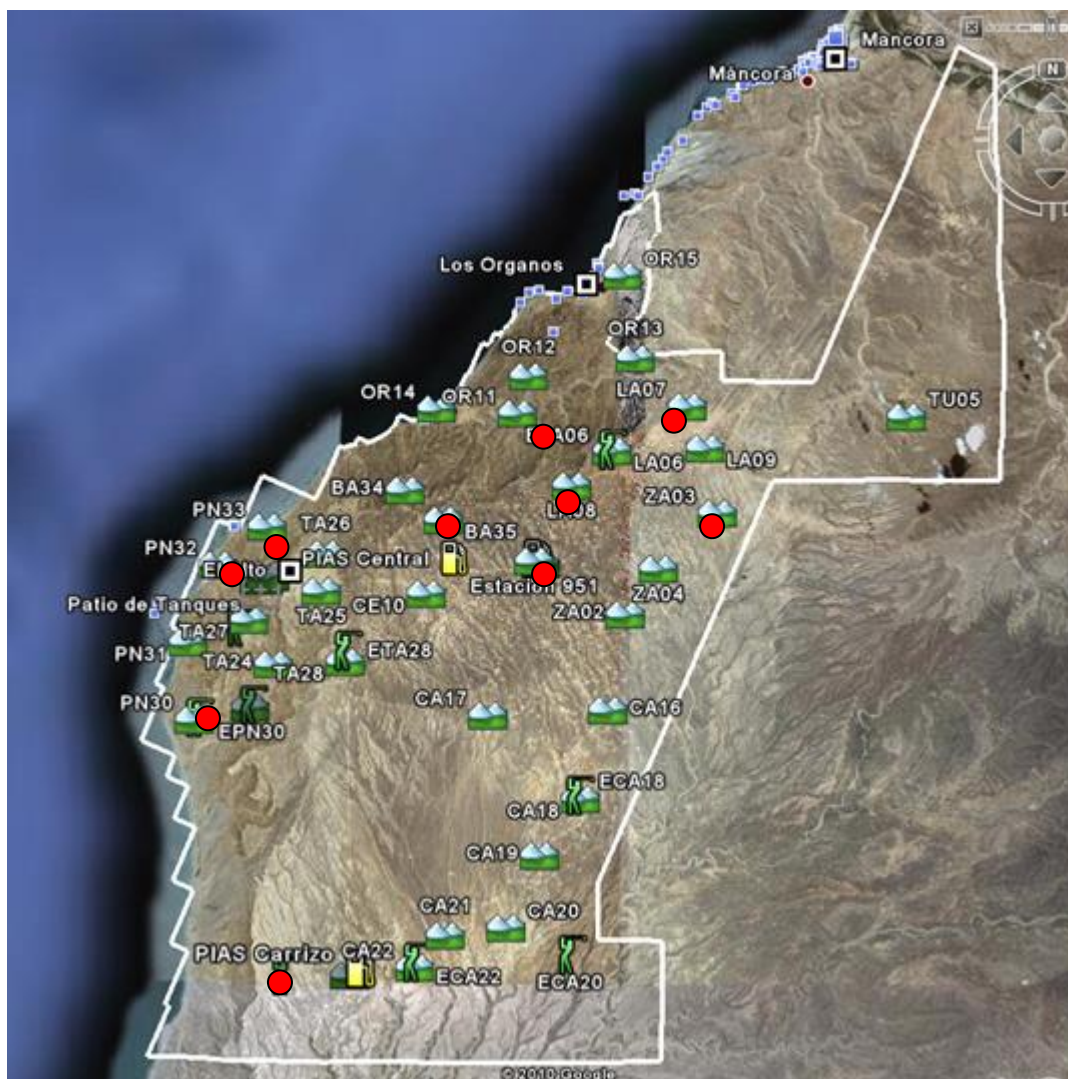


Figura 8. Mapa de ubicación de las estaciones estudiadas. Los círculos rojos indican la ubicación de las 10 estaciones estudiadas.

Composición de los aceros estudiados

La composición elemental de las probetas fue determinada por Fluorescencia de Rayos X (FRX). La fluorescencia de rayos X consiste en emisión de rayos X secundarios o fluorescentes característicos de un material que ha sido excitado al ser bombardeado con rayos de alta energía o rayos gama. Este fenómeno es muy utilizado para análisis elemental.

Parámetros ambientales

Humedad relativa

Hemos utilizado un termo higrómetro de 3 velocidades, marca Oakton, modelo CP-37250-20. La humedad fue medida en 3 estaciones, una ubicada cercana a la Playa (E-2 PN32) y las otras en las Instalaciones Industriales importantes, E-6 PTC y E-9 estación 951.



Figura 9. Termo higrómetro antes de ser instalado en una de las 3 estaciones monitoreadas.

La humedad relativa también fue determinada con un psicrómetro de acuerdo al ASTM E 337 “Método estándar para la medición de humedad con un psicrómetro. Medición de bulbo seco y bulbo húmedo” (16).

Cloruros

Los cloruros en la atmosfera fueron medidos en las 10 estaciones en estudio. El método utilizado es el descrito en la norma ISO 9225 “Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Measurement of Pollution” (3).



Figura 10. Montaje del equipo capturador de cloruros ambientales. Método llamado de la vela.

Velocidad del viento

La velocidad del viento fue determinada mediante anemómetros manuales.

Polución: medición de $PM_{2.5}$, H_2S , SO_2 y NO_2

La determinación de NO_2 , ha sido realizada de acuerdo a D.S. No 074-2001-PCM “Reglamento de Estándares Nacionales de calidad ambiental”. El resto de especies químicas fueron determinadas según lo descrito en el DS No 003-2008-MINAM “Estándares de calidad ambiental para aire” (17).

Caracterización de productos de corrosión y material depositado sobre las probetas

El estudio de los productos de corrosión formados sobre la probeta de acero al carbono reviste un gran interés debido a que permite conocer los productos de corrosión y el desarrollo del proceso de la corrosión. J. J. Santana realizó un trabajo similar con el propósito de conocer el mecanismo de transformación de los productos de corrosión y su efecto protector (8).

Los sólidos depositados sobre probetas AISI/SAE 1020 expuestas por 280 días fueron retirados y almacenados en sobre de papel y lacrados para su

transporte al laboratorio de INGEMMET para analizarlos por difracción de rayos X con un difractómetro marca Shimadzu modelo XRD 2000. Ver difractómetros y Tabla de resultados en el Anexo 5.

De igual manera a los 385 días se retiraron los sólidos de las probetas instaladas en las estaciones E1, E2 y E5 para su caracterización por difracción de rayos X mediante un equipo Bruker D4 Endeavor con tubo Cu (40kV, 40 Ma), filtro Kbeta de Ni, detector LynnxEye, geometría Bragg – Brentano del laboratorio de la Cia BISA. La identificación mineralógica ha sido realizada mediante el uso del programa Difracc Plus Evaluation, utilizando la base de datos del Centro Internacional para Datos de Difracción (CIDD).

Con el propósito de profundizar más el conocimiento del proceso de corrosión se retiraron sólidos de la probeta de acero ASTM A36 expuesta por 726 días en la estación E5 PN 30 y fueron analizadas en un microscopio electrónico FEI QUANTA 200 del Laboratorio MYAP.

Medición de la profundidad de picaduras

La medición de la profundidad de las picaduras en las probetas corresponde a un valor promedio de 3 probetas. El propósito es conocer la velocidad de penetración de la picadura en el tiempo de exposición.

Esta medición se realizó mediante el uso de un instrumento Elcometer 123 Profile Gauge Analog.

4. RESULTADOS

Velocidad de corrosión determinada mediante la pérdida de peso de probetas de acero en estaciones. Composición Química.

A continuación se muestra el resultado del análisis elemental de las probetas estudiadas por FRX, acero AISI/SAE 1020 y ASTM A36. Como podrán apreciar la diferencia sustancial de estos aceros radica en la presencia de Mn, Cu y Si en el acero ASTM A36, elementos que brindan mayor resistencia a la corrosión a aceros de bajo Carbono.

Tabla 8. Composición química de las probetas de acero.

Elemento	Acero AISI / SAE 1020 (%)	Acero ASTM A 36 (%)
Fe	99,25	98,97
C	0,64	0,13
Mn	0,00	0,61
P	0,06	0,02
S	0,05	0,01
Cu	0,00	0,03
Si	0,00	0,23

Mediciones al primer año sobre probetas de acero AISI/SAE 1020 y ASTM A36

La velocidad de corrosión al año de exposición para las probetas de acero AISI/SAE 1020 y ASTM A36 se muestra a continuación en la Tabla 09. La correspondiente información de pérdida de peso esta reportada en el Anexo 1

Tabla 9. Resultados de velocidad de corrosión después de 1 año de exposición, $\mu\text{m}/\text{año}$, en probetas de acero AISI/SAE 1020 y ASTM A36, según ISO 9223. C2 – corrosión baja, C3 – corrosión Media, C4 – corrosión alta.

Estación	Distancia de la línea de Playa, m	Altitud m.	Velocidad Promedio de corrosión del acero AISI/SAE 1020, $\mu\text{m}/\text{año}$ y Categoría de corrosividad atmosférica según ISO 9223	Velocidad Promedio de corrosión del acero ASTM A36, $\mu\text{m}/\text{año}$ y Categoría de Corrosividad atmosférica según ISO 9223
E1 Batería PN 33	822	91	18,84 / C2	17,34 / C2
E2 Batería PN 32	586	26	18,01 / C2	17,06 / C2
E3 Batería OR 11	2 738	20	13,67 / C2	12,69 / C2
E4 Batería BA 35	4 650	297	17,71 / C2	17,32 / C2
E5 Batería PN 30	820	41	65,67 / C4	39,62 / C3
E6 Estación PTC	5 900	178	19,64 / C2	17,06 / C2
E7 Batería LA 08	5 530	296	14,92 / C2	14,08 / C2
E8 Batería LA 07	7 000	296	15,53 / C2	14,75 / C2
E9 Estación 951	6 975	279	14,15 / C2	13,81 / C2
E10 Batería ZA 03	10 022	270	14,04 / C2	13,38 / C2

Las correspondientes ecuaciones de velocidad de corrosión en probetas de acero al carbono AISI/SAE 1020 durante un año de exposición son mostradas en la Tabla 10.

Tabla 10. Ecuaciones de velocidad de corrosión atmosférica de probetas fabricadas con acero AISI/SAE 1020 después de 1 año de exposición.

Estación	Ecuación de Velocidad de Corrosión, Acero AISI/SAE 1020, $\mu\text{m/año}$
PN 30 E5	$414,95 t^{-0.3206}$
PN33 E1	$1041,00 t^{-0.7052}$
PN 32 E2	$507,44 t^{-0.5589}$
PTC E6	$161,33 t^{-0.3729}$
LA 08 E7	$184,86 t^{-0.4301}$
LA 07 E8	$169,29 t^{-0.4028}$
OR 11 E3	$149,21 t^{-0.4095}$
BA 35 E4	$149,36 t^{-0.367}$
Estación 951 E9	$181,53 t^{-0.4356}$
ZA 03 E10	$159,38 t^{-0.4136}$

Mediciones al segundo año en probetas de acero ASTM A36

En el segundo año hemos estudiado la corrosión sobre probetas de acero ASTM A36. El acero AISI /SAE 1020 es muy susceptible a la corrosión en ambientes marinos y por tanto el deterioro de las probetas impide un estudio exhaustivo en mediano y largo plazo.

Los resultados de la velocidad están reportados en la tabla 11 y graficados en la figura 11.

Tabla 11. Resultados de velocidad de corrosión atmosférica sobre probetas de acero ASTM A36 a 1 y 2 años de exposición.

Velocidad de Corrosión Atmosférica en probetas construidas con acero ASTM A36			
Estación de Ensayo	Ubicación	Tiempo de Exposición, años	
		1año	2 años
E1	PN 33	17,34	16,14
E2	PN 32	17,06	5,11
E3	OR 11	12,69	6,44
E4	BA 35	17,32	No disponible
E5	PN 30	39,62	10,93
E6	PTC	17,06	3,25
E7	LA 08	14,08	0,22
E8	LA 07	14,75	0,74
E9	Estación 951	13,81	1,39
E10	ZA 03	13,38	0,32

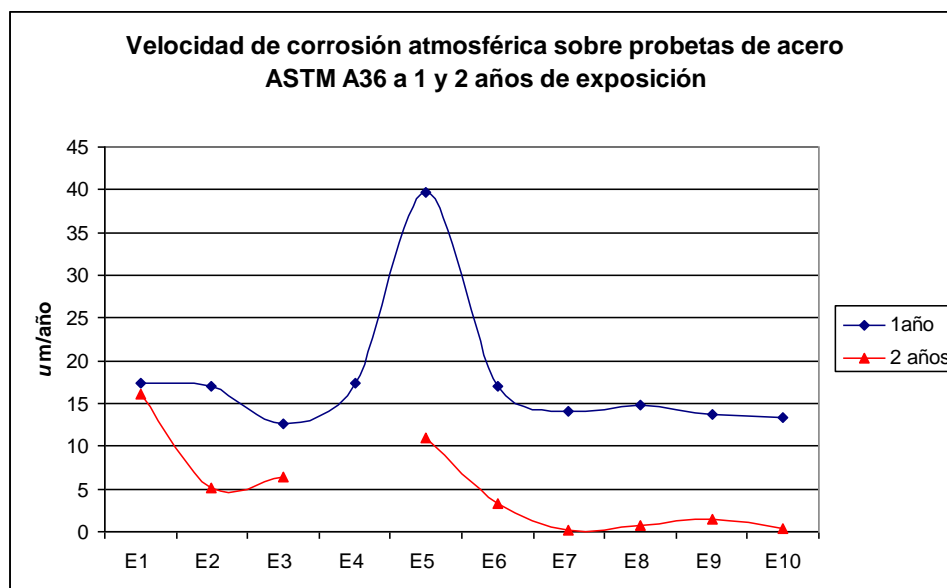


Figura 11. Velocidad de corrosión atmosférica sobre probetas de acero ASTM A 36 a 1 y 2 años de exposición.

Velocidad de penetración de las picaduras por corrosión atmosférica en probetas ASTM A36 a 1 y 2 años de exposición

Mediciones al primer año en probetas de acero AISI/SAE 1020 y ASTM A36

La medición de la profundidad de la corrosión localizada, con el equipo ELCOMETER reporta que la velocidad de penetración de la corrosión localizada es mayor en aceros AISI/SAE 1020 que en probetas de acero ASTM A36, según datos exhibidos a continuación en la tabla 12 (ver Anexo 2).

Tabla 12. Velocidad de penetración máxima de corrosión localizada después de 1 año de exposición en aleaciones AISI/SEA 1020 y ASTM A36, $\mu\text{m} / \text{año}$.

Velocidad de penetración máxima, corrosión localizada, después de 1 año de exposición, $\mu\text{m}/\text{año}$										
ESTACION	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
AISI/SAE 1020	103,73	81,32	127,51	79,00	Hueco	75,3	79,6	74,92	127,39	105,62
ASTM A36	25,4	167,64	45,72	41,82	147,32	55,88	38,1	43,18	40,64	35,56

Mediciones al segundo año en probetas de acero ASTM A36.

La penetración de las picaduras, fue medida al primer y segundo año en probetas de acero ASTM A36. Los resultados se muestran en la tabla 13 y graficados en la figura 12.

Tabla 13. Resultados de medición de la profundidad máxima y mínima de las picaduras al 1er y 2do Año, μm .

Comparación de profundidad de picadura en probetas de 1 y 2 años de exposición, μm					
Estación	Batería	Profundidad de Picadura en el 1er Año		Profundidad de Picadura el 2do Año	
		Minima	Máxima	Minima	Máxima
E5	PN 30	12,70	147,32	60,96	294,64
E1	PN 33	5,08	25,40	66,04	119,38
E2	PN 32	12,70	167,64	81,28	162,56
E6	PTC	10,16	55,88	86,36	142,24
E3	OR 11	2,54	45,72	60,96	93,98
E8	LA 07	17,78	43,18	60,96	104,14
E10	ZA 03	12,70	35,56	48,26	93,98
E7	LA 08	7,62	38,10	53,34	114,30
E9	Estacion 951	15,24	40,64	68,58	116,84

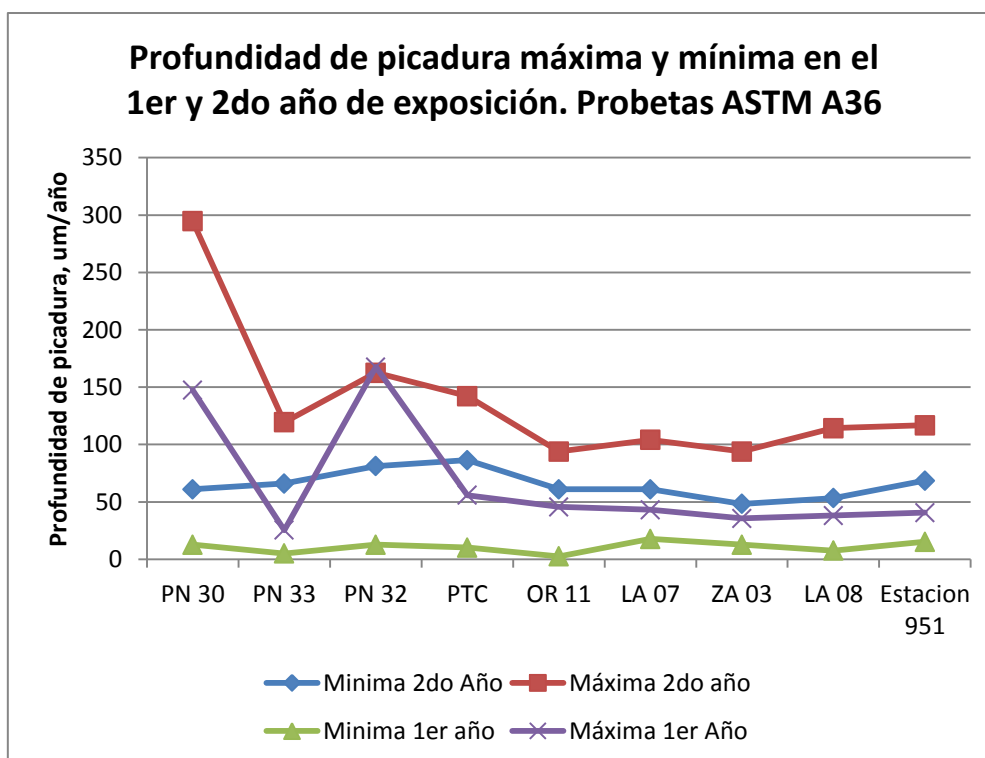


Figura 12. Profundidad de picadura, en probetas de acero ASTM A36 después de 2 años de exposición, μm .

Análisis de la superficie del metal corroído por microscopia electrónica y fluorescencia de rayos X en probetas ASTM A36 y AISI/SAE 1020

Análisis de probetas a un año de exposición en la estación E5 PN30, la más cercana al mar

Las probetas AISI /SAE 1020 y ASTM A36 expuestas por 398 días en la estación E5, de mayor corrosión, fueron limpiadas y examinadas con microscopia electrónica, con el propósito de apreciar fenómenos superficiales.

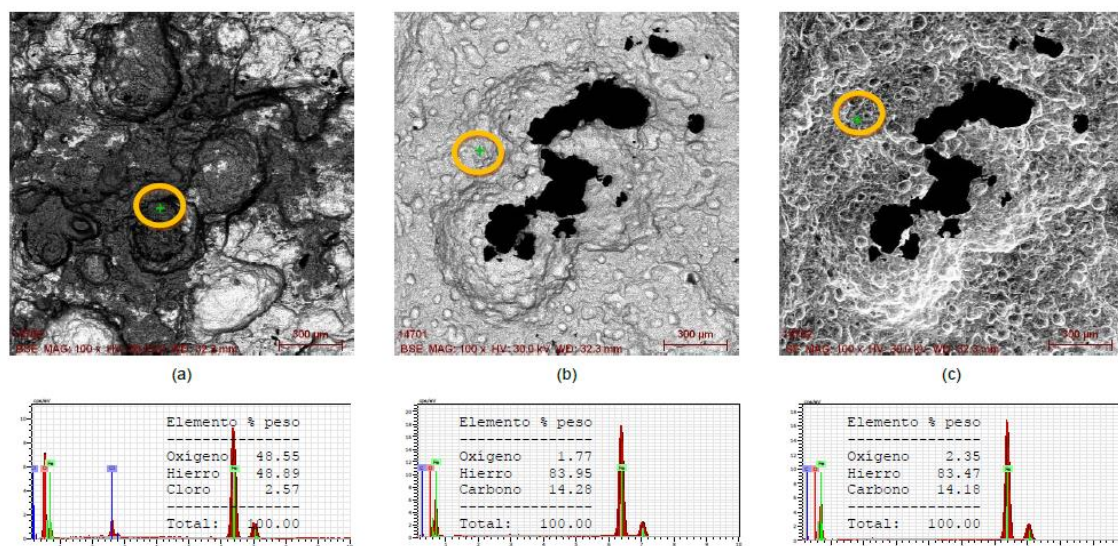


Figura 13. Imágenes SE 100 X de la Muestra E5 12C de la estación PN 30, 398 días de exposición, (Acero AISI 1020): (a) Mezcla de Goethita + Cl (b) Aleación Fe-C + CO₃ con presencia de huecos provocados por corrosión de la probeta y (c) Imagen de Electrón Secundario (Aleación Fe - C + CO₃) con presencia de cavidades provocadas por el proceso de corrosión.

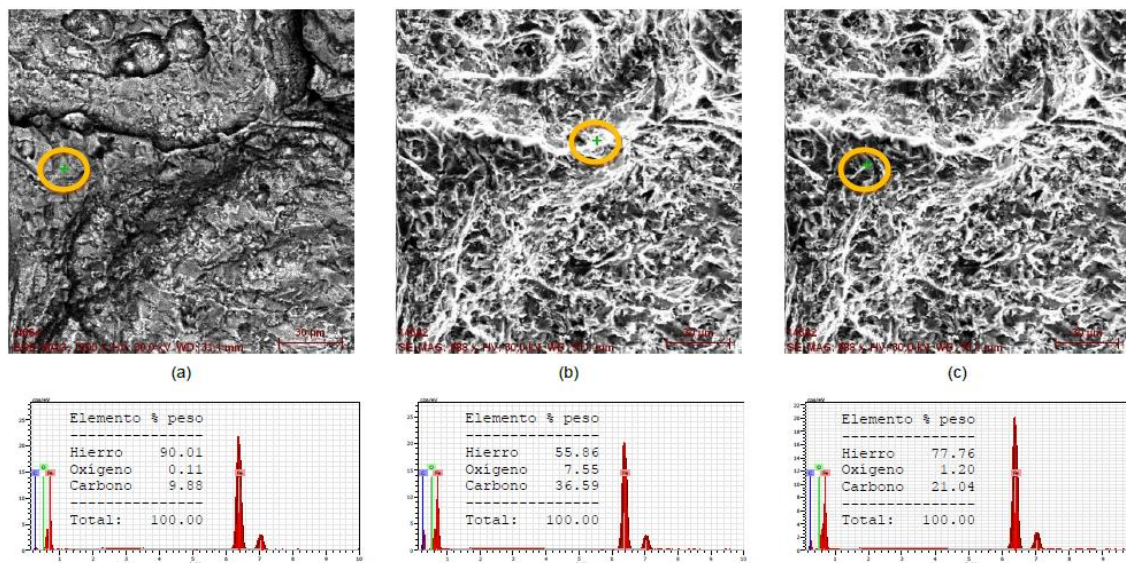


Figura 14. Imágenes SE - 1000X, de la muestra E5 24 A de la estación PN 30 después de 398 días de exposición (Acero ASTM A 36). Análisis puntual (a) Aleación Fe - C (b) Aleación Fe - C + CO₃ con presencia de cavidades provocadas por el proceso de corrosión (c) Imagen de la región corroída con la presencia de CO₃ + Fe - C.



Figura 15. Las fotos corresponden a Probetas AISI /SAE 1020 (izquierda) y ASTM A36 (derecha) expuestas por 398 días en la estación E5 Batería PN 30, después de limpieza. La afectación superficial por corrosión es mayor en la aleación AISI/SAE 1020. En ambas la corrosión es tipo localizada.

Análisis por Microscopia electrónica de depósitos en probetas ASTM A36 a dos años de exposición en la estación E5 PN 30

A continuación se muestra la vista al microscopio y su respectiva composición elemental de caras internas y externas de cascarilla de sólidos depositados sobre probetas expuestas en la Estación E5 PN 30 durante 2 años.

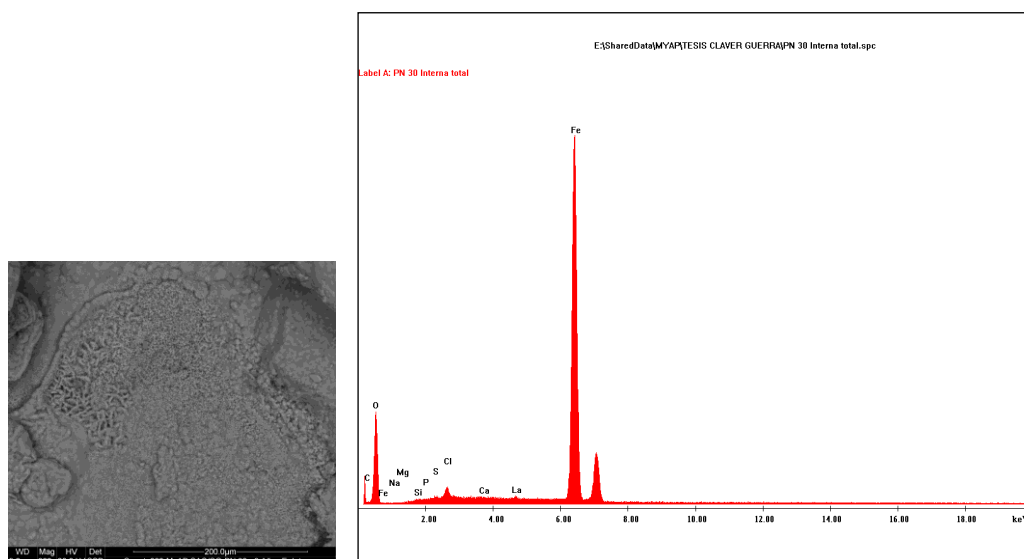


Figura 16. Vista en microscopio de barrido electrónico de la cara interna de una cascarilla depositada en una probeta de acero ASTM A36 después de 2 años de exposición en la estación E5 PN 30.

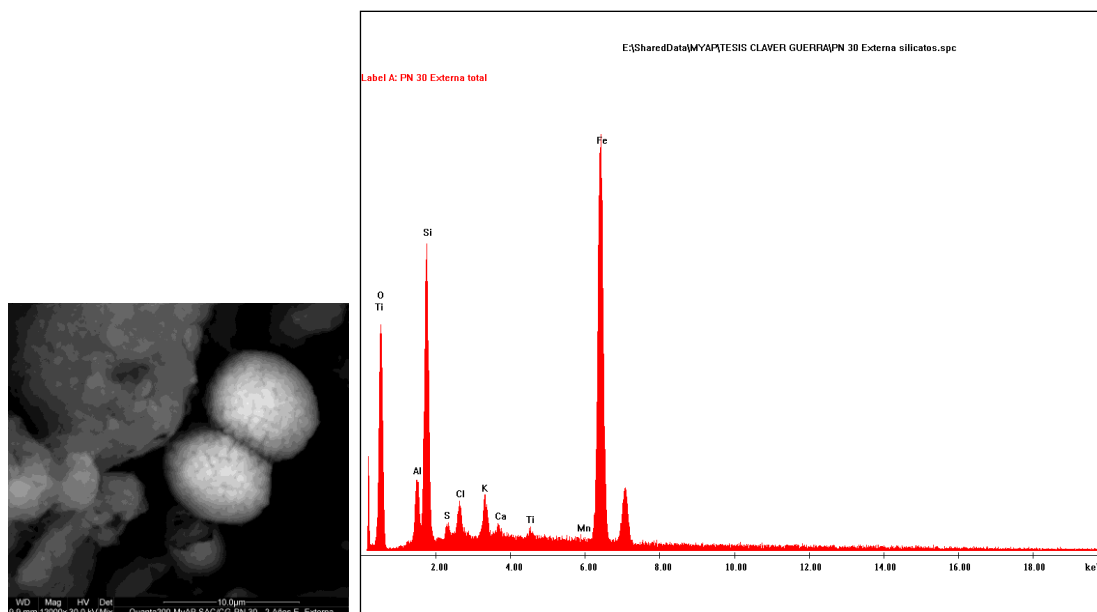


Figura 17. Vista al microscopio electrónico de la cara externa de la película de depósito sobre una probeta de acero ASTM A 36 expuesta por 2 años en la estación E5, PN 30.

En la Figura 16 podemos apreciar que la cara interna de la cascarilla muestra alta riqueza en Fe y otros elementos en muy poca cantidad. En la Figura 17, correspondiente a observaciones de la cara externa de la cascarilla, apreciamos además de Fe, abundante presencia de Ti y Si lo que nos sugiere la presencia de sólidos extraños depositados sobre la probeta, provenientes del medio ambiente.

Análisis de depósitos de probetas en Difractómetro de Rayos X.

Composición de sólidos depositados en probetas de acero

Probetas AISI/SAE 1020 después de 285 días de exposición (21 y 22 de Junio del 2011 antes de temporada de vientos fuertes).

Los depósitos de las probetas AISI/SAE 1020 instaladas en las 10 estaciones después de un periodo de exposición de 285 días fueron retirados de las probetas para analizarlos por difracción de rayos X con un difractómetro marca Shimadzu modelo XRD 2000, en el laboratorio de INGEMMET.

En el Anexo 6 se muestran los resultados resumidos en una Tabla y los respectivos difractogramas de las 10 Estaciones. La Figura 18 muestra el difractograma de los depósitos muestreados en la Estación E1 PN 33.

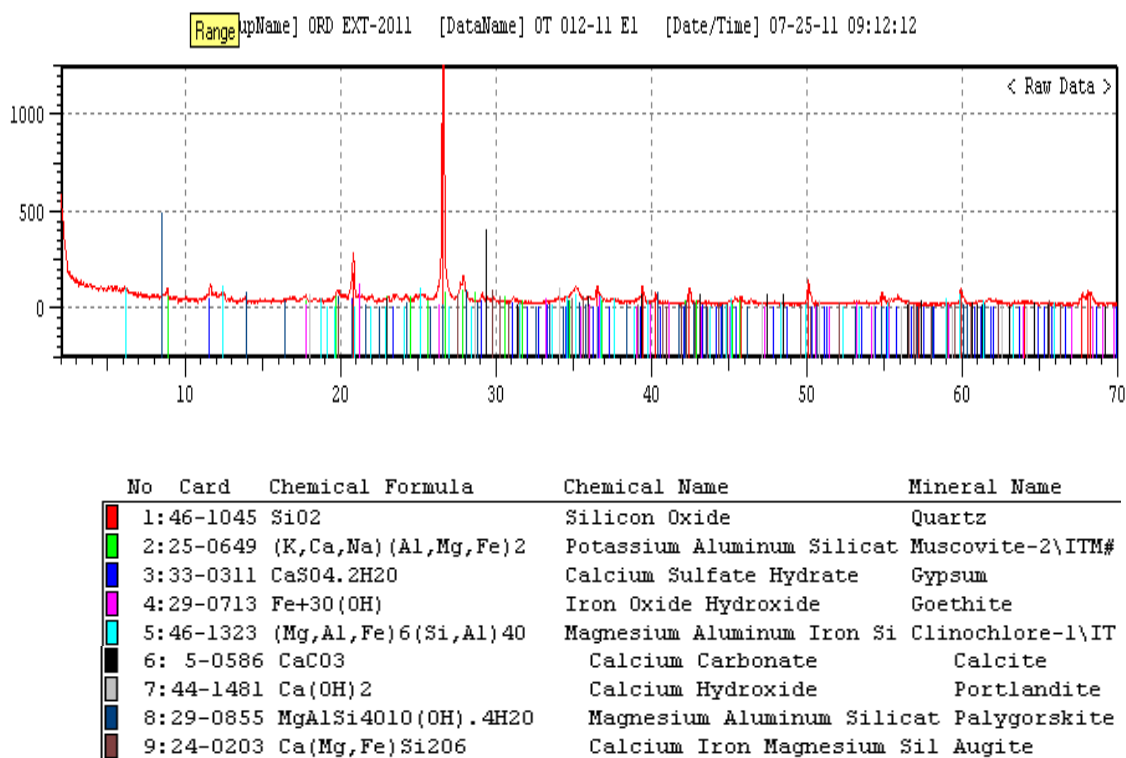


Figura 18. Difractograma de los depósitos de la Estación E1 PN 33, colectados de probetas expuestas durante 285 días.

Análisis de sólidos de Probetas AISI/SAE 1020 de las estaciones E1, E2 y E5 y probetas ASTM A36 de la estación E5 después de 396 días de exposición (retiradas el 13 de Noviembre del 2011 al final de temporada de vientos fuertes).

En el laboratorio BISA fueron analizados por Difracción de Rayos X, los sólidos de las probetas fabricadas con acero ASTM A 36 de la estación E5 PN 30 cercana al mar y de las probetas AISI/SAE 1020 de las estaciones también cercanas al mar E1, E2 y E5, todas estuvieron expuestas 396 días. Los productos de corrosión son similares a los que se identificaron en los sólidos de las probetas retiradas a los 9 meses (junio del 2011 cuando aún no empezaba la temporada de fuertes vientos, agosto a octubre). La variación en contenido porcentual es atribuido a los vientos fuertes del periodo agosto – octubre.

Los resultados de los análisis de sólidos retirados de estas probetas se exhiben en la tabla 14 y se grafican en la figura 19.

Tabla 14. Resultados de análisis de sólidos retirados de probetas instaladas en estaciones cercanas al mar, después de 396 días de exposición por DRX, %.

Compuesto	E1 – PN 33 AISI 1020	E2 – PN 32 AISI 1020	E5 – PN 30 AISI 1020	E5 PN 30 ASTM A 36
Akaganeita	18	5	20	27
Goethita	16	6	50	47
Lepidocrocita	0	0	2	4
Mica (Muscovita)	16	20	0	0
Plagioclasa	13	17	0	0
Clinocloro	10	11	0	0
Yeso	3	2	0	0
Calcita	Menos de LD*	Menos de LD	0	0
Halita	Menos de LD	Menos de LD	0	0
Magnetita	0	0	17	5
Hematita	0	0	10	16
Cuarzo	22	36	0	0

- LD Límite detectable.

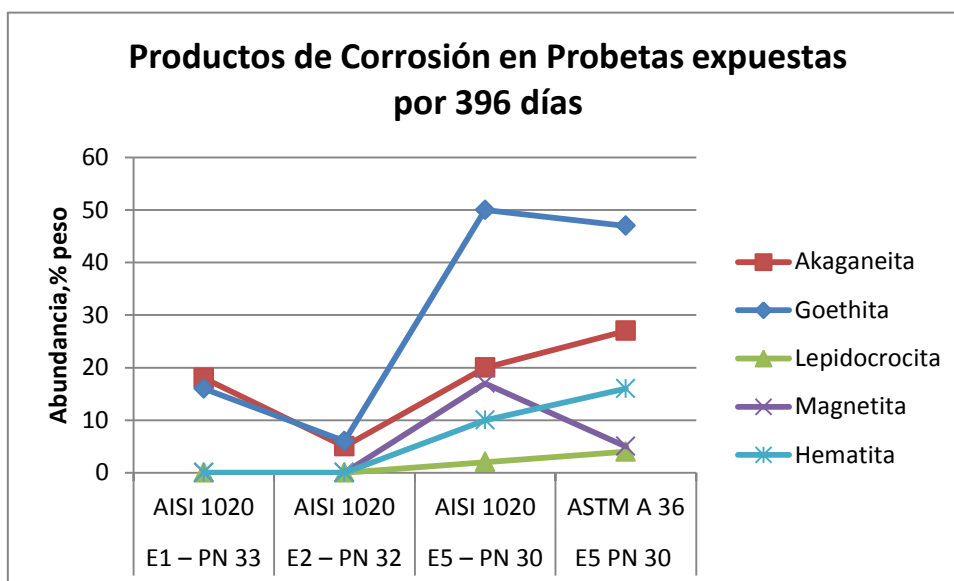


Figura 19. Los productos de corrosión en las probetas de estaciones cercanas al mar y expuestas por 396 días son los mismos que se exhiben para los depósitos retirados a los 9 meses (280 días).

Humedad ambiental

La humedad relativa fue medida en 3 estaciones durante el primer año con un higrómetro. Sin embargo, algunos problemas de carácter operativo impidieron que esta medición fuera continua.

Para la clasificación del ambiente por el tiempo de humectación, según la norma ISO 9223, debemos registrar el número de horas al año durante el cual la humedad relativa es mayor a 80% y la temperatura mayor a 0° C.

La siguiente tabla 15 resume el total de horas con humedad relativa mayor a 80%, el total de horas de registro de la humedad relativa y el porcentaje de humectación.

Tabla 15. Valores de humedad ambiental relativa medidos con un Termo higrómetro Oakton Modelo P-37250-20.

Variable	E2 Batería PN 32 Ambiente protegido de la brisa del mar por cerros	E6 Estación PTC Ambiente descubierto	E9 Estación 951 Ambiente descubierto
Periodo bajo Humedad Relativa mayor a 80%, hrs.	1 880	545	340
Tiempo de Registro, hrs.	6 111	5 784	2 832
Porcentaje	30,8	9,4	12,0

Cloruros en el ambiente

Los cloruros en la atmosfera fueron monitoreados según la norma ISO 9223, “*corrosión of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres – Measurements of pollution*”, el monitoreo fue realizado durante el primer año. En la tabla 16, se muestra el contenido de cloruros medidos en cada estación y su categorización.

Tabla 16. Velocidad promedio de deposición de cloruros, determinados según la norma ISO 9223.

Velocidad promedio de depósitos de cloruros, determinada según ISO 9223, mg/m ² .día			
Estación	Ubicación	Velocidad promedio de depósito de cloruros, mg/m ² .día	Categoría de salinidad atmosférica
E5	PN 30	109,2	S ₂
E1	PN 33	51,26	S ₁
E2	PN 32	43,66	S ₁
E3	OR 11	33,13	S ₁
E4	BA 35	34,21	S ₁
E6	PTC	92,56	S ₂
E7	LA 08	44,21	S ₁
E8	LA 07	46,57	S ₁
E9	Esta. 951	38,7	S ₁
E10	ZA 03	25,61	S ₁

Mapas de corrosión

En el Lote X, la velocidad de corrosión es mayor en áreas cercanas al mar y de libre exposición a la brisa marina. Los mapas que a continuación mostramos

(figuras 20 y 21) reflejan la velocidad de la corrosión atmosférica de los aceros ASTM A36 y AISI/SAE 1020 en este Lote.

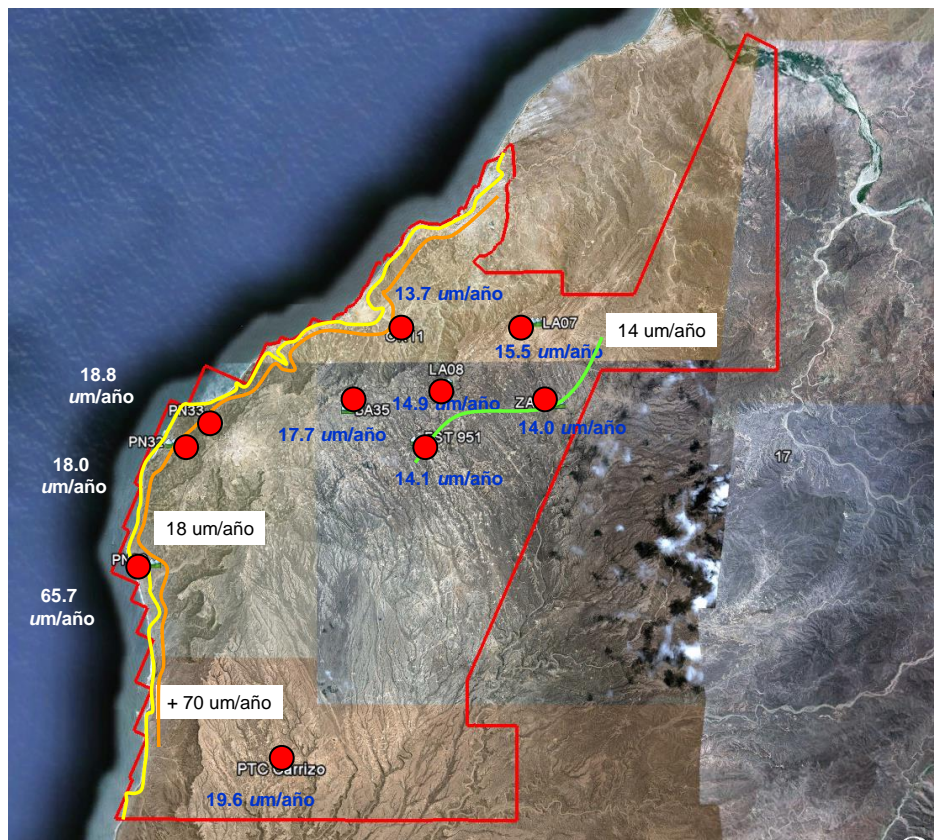


Figura 20. Mapa de corrosión para acero AISI/SAE 1020. Se ha considerado 3 curvas de velocidad de corrosión, 70, 18 y 14 $\mu\text{m/año}$. La de mayor corrosividad corresponde a áreas cercanas al mar y despejadas de accidentes geográficos que permiten su libre exposición a la brisa marina.

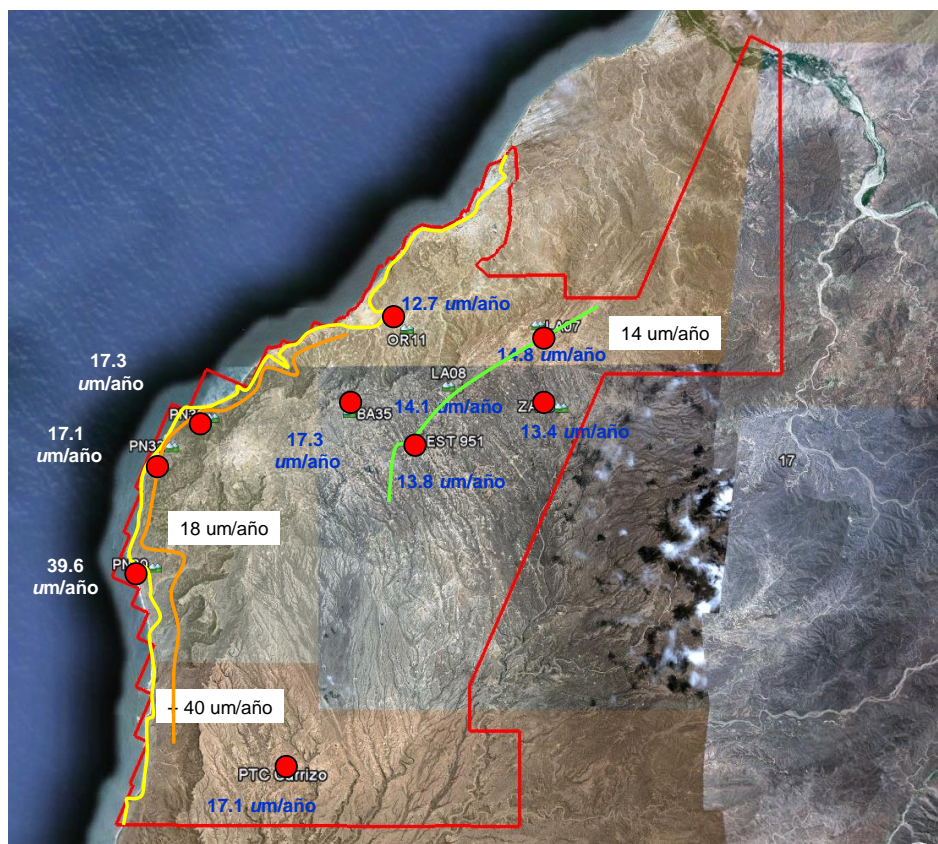


Figura 21. Mapa de corrosión para acero ASTM A 36. Se ha considerado 3 curvas de velocidad de corrosión, 40, 18 y 14 $\mu\text{m/año}$. La de mayor corrosividad corresponde a áreas cercanas al mar y despejadas de accidentes geográficos que permiten su libre exposición a la brisa marina. El resto de áreas tienen similar impacto corrosivo para aceros AISI/SAE 1020 y ASTM A 36.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Velocidad de corrosión y su categorización.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo indican que la corrosión atmosférica en el Lote X para los aceros AISI/SAE 1020 y ASTM A36 está íntimamente relacionada a la exposición a la brisa marina. Cuando una ubicación está cerca al mar y libremente expuesta a la brisa marina, la atmosfera es muy corrosiva. Esta corrosividad es atribuida a la mayor humedad y el contenido de cloruros en la brisa marina.

En las figuras 22 y 23 podemos apreciar que la estación E5 PN 30, a 820 m de la Playa y ubicada en una zona de libre circulación de la brisa marina, reporta la mayor corrosividad para ambos tipos de materiales AISI/SAE 1020 y ASTM A36. El efecto de la velocidad de deposición de cloruros sobre la corrosión se muestra en la figuras 29.

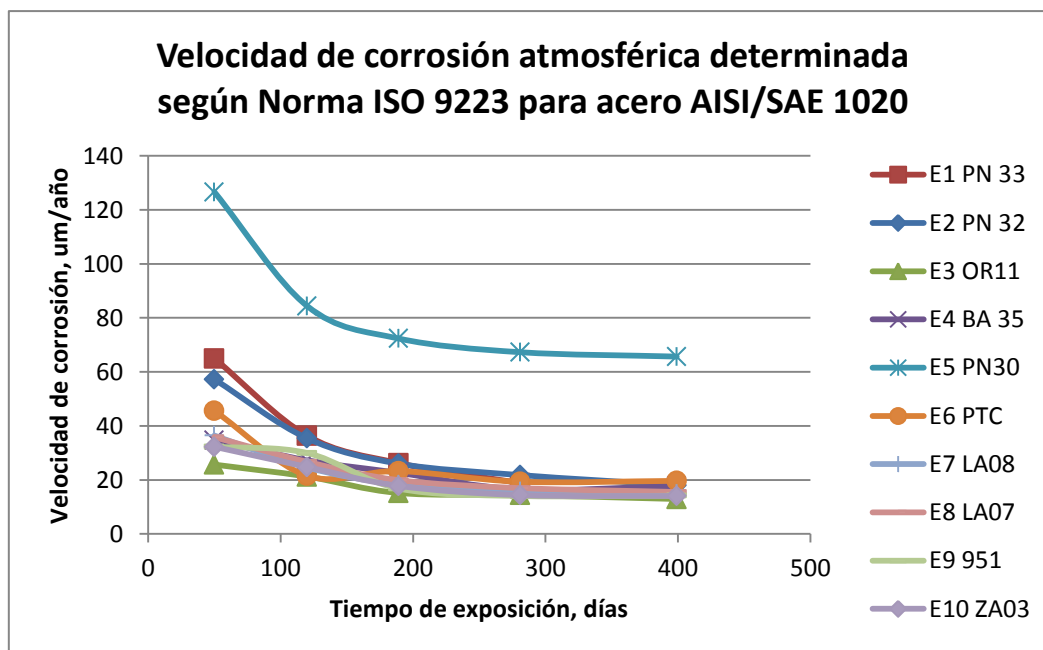


Figura 22. Velocidad de corrosión en probetas AISI/SAE 1020 durante 1 año de exposición.

Según los resultados de este estudio de tesis y basados en la norma ISO 9223, un ambiente cercano al mar, del Lote X, es categorizado de alta corrosividad

(C4) para el acero AISI/SAE 1020, pero de mediana corrosividad (C3) para un acero ASTM A36. Las instalaciones que están ubicadas cerca al mar, pero detrás de algún cerro que impide la libre circulación de la brisa, reportan baja corrosividad (C2) para los aceros AISI/SAE 1020 y ASTM A36.

La figura 23 muestra que las estaciones ubicadas a distancias mayores de 2700 metros del Mar reportan baja corrosividad (C2). La estación 5 está ubicada en una zona muy expuesta a la brisa marina y las estaciones E2 y E1 si bien están cerca al mar, su exposición a la brisa marina es interrumpida por accidentes geográficos y califican como ambientes C2.

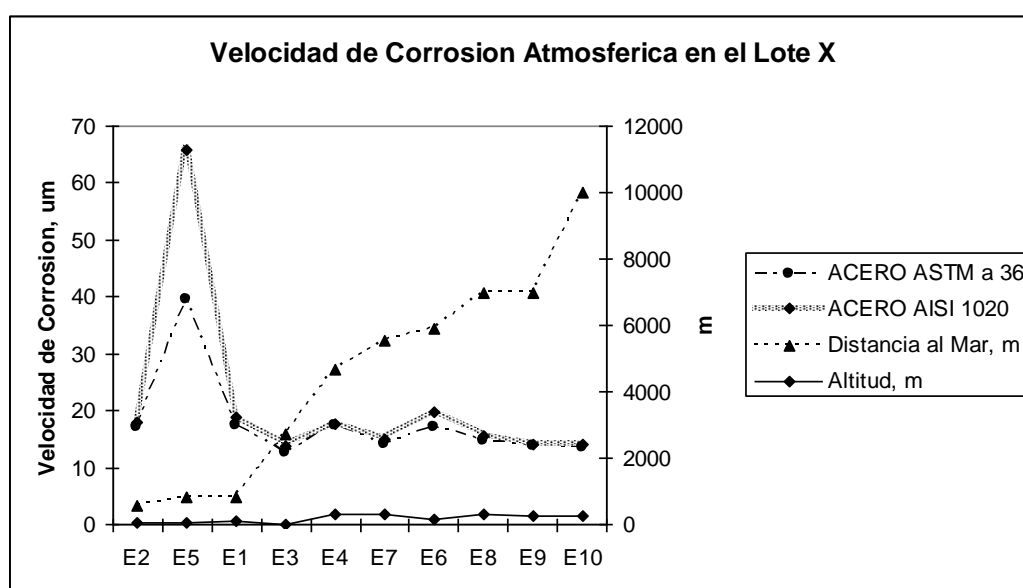


Figura 23. Velocidad de Corrosión atmosférica de probetas de Acero AISI /SAE 1020 y ASTM A36 después de 1 año de exposición en las 10 estaciones bajo estudio.

Las estaciones lejanas al mar, son ambientes de corrosividad C2 para aceros AISI/SAE 1020 y ASTM A36, debido a la baja humedad y bajo contenido de Cloruros (23). El Lote X está ubicado mayormente en un área desértica (ver tabla 13), apenas posee una franja costera muy estrecha, limitada hacia el continente por levantamientos geológicos que ubican al resto del área a altitudes por encima de 275 m sobre el nivel del mar.

La velocidad de corrosión atmosférica (C) versus tiempo (t), en probetas de acero AISI/SAE 1020, durante un año de exposición puede expresarse según la siguiente Ecuación

$$C = A \cdot t^{-n}$$

Dónde: t, es el tiempo de exposición de las probetas en días, y

C, es la velocidad de corrosión en $\mu\text{m/año}$

Los valores de A y n varían para cada estación y están relacionados a la humedad, cloruros y sólidos adsorbidos sobre la superficie.

Para las estaciones ubicadas 2700 metros lejanas al mar, estos valores son muy similares de tal forma que podríamos enunciar para ellas una ecuación general como la que indicamos a continuación

$$C = 164,99 t^{-0,4045}$$

Otra variable importante que debe ser considerada en los estudios de corrosión atmosférica, es la velocidad de crecimiento de la profundidad de las picaduras. Esta fue medida en las probetas AISI /SAE 1020 durante el 1er Año, y hemos apreciado que correlaciona muy bien con la velocidad de corrosión determinada por pérdida de peso. En estaciones cercanas al mar se ha podido determinar claramente que la velocidad de penetración es alta al inicio y declina notablemente a partir del sexto mes hasta llegar a ser muy baja, tal como se aprecia en la Figura 24. Esto sugiere que los productos de corrosión forman inicialmente una costra o cascarilla que es capaz de reducir el paso del oxígeno y la humedad y por consiguiente reducen la velocidad de corrosión.

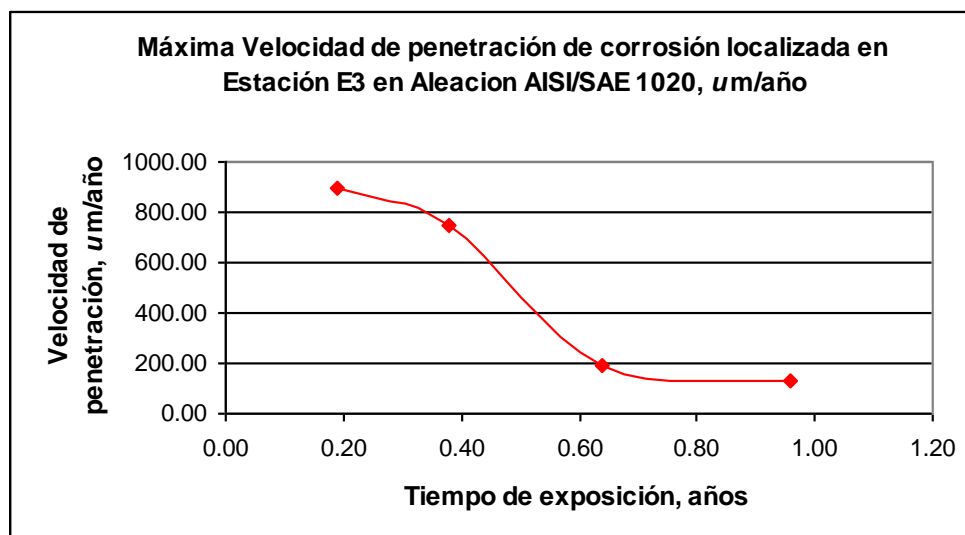


Figura 24. Velocidad de penetración de corrosión localizada en aleaciones AISI/SAE 1020 en la estación E3, ubicada en la Batería PN 30.

Características superficiales de probetas de acero AISI/SAE 1020 y ASTM A36.

El análisis al microscopio electrónico, ejemplo figuras 13 y 14, muestra que la superficie del acero AISI /SAE 1020 es más rugosa que la del acero ASTM A36, esto implica postular que los procesos de quimisorción del oxígeno, absorción de humedad y adsorción de sólidos son favorecidos en el acero AISI/SAE 1020 y por consiguiente facilitan la ocurrencia del proceso de corrosión. Gehard Ertl en su estudio sobre reacciones en superficies sólidas menciona el impacto de la morfología de la superficie sobre la corrosión (25), similar concepto es también mencionado por J.C.Scully (26).

Productos de corrosión y deposición de sólidos

Las observaciones en el microscopio electrónico de los sólidos depositados sobre las probetas de acero ASTM A36 expuestas por dos años, muestran que la cara de la costra o cascarilla interior y en contacto con el metal, tiene un mayor contenido de óxidos de hierro, que la cara externa, figura 16 y 17. Esto evidencia que la corrosión del metal, ocurrió inicialmente a alta velocidad y seguidamente disminuye debido a la formación de una costra que se adhiere al metal e impide el fácil ingreso del oxígeno del aire y humedad.

Las probetas en ambiente cercano al mar, estación E5 PN 30, muestran costra de productos de corrosión gruesa y menos adherida a la superficie del metal.

En probetas de acero AISI/SAE 1020, después de 285 días (9 meses aproximadamente) de exposición, los productos de corrosión identificados en las costras o cascarillas son la akaganeita, goethita, lepidocrocita, magnesioferrita, hematita y pirita, siendo los productos más abundantes la akaganeita y lepidocrocita seguidos de la goethita, ver figura 25. Juan Jaén reporta también estos productos en su estudio de corrosión para el ambiente marino tropical de Sherman, provincia de Colón - Panamá (20).

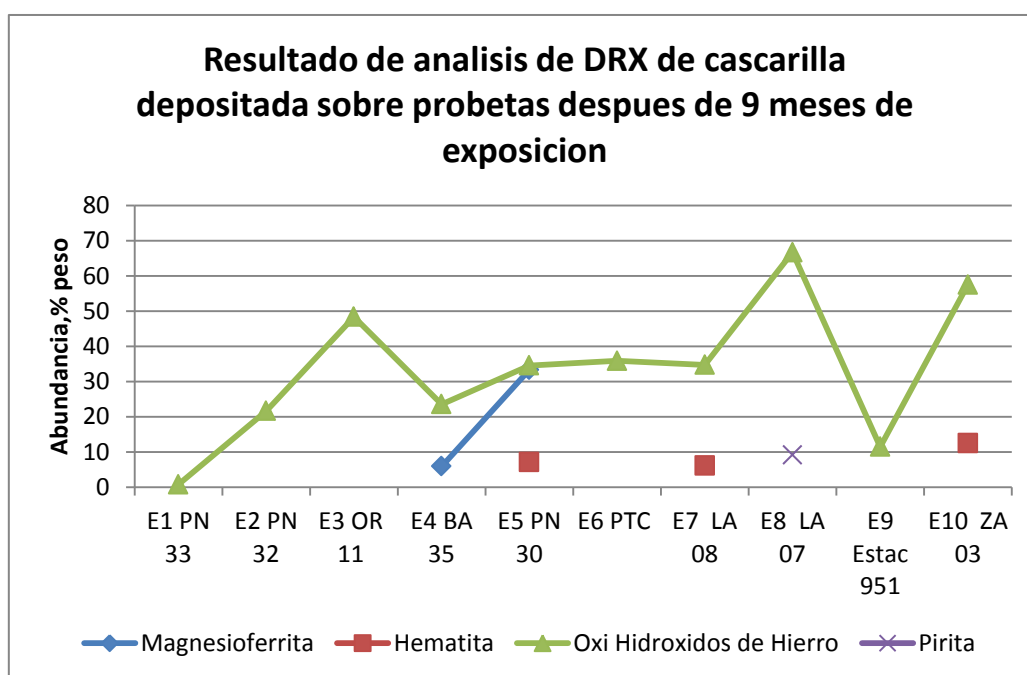


Figura 25. Productos de corrosión en las probetas AISI/SAE 1020 expuestas por 9 meses.

Cabe señalar que en la estación E5 PN30 las 3 especies de hidróxidos de hierro están en igual proporción, ver figura 26. Así mismo podemos decir que la lepidocrocita predomina en las estaciones lejanas al mar. Esta lepidocrocita pasara a goethita con el transcurrir del tiempo, tal como se aprecia en las Estaciones E1 y E2 después de 396 días, figura 19.

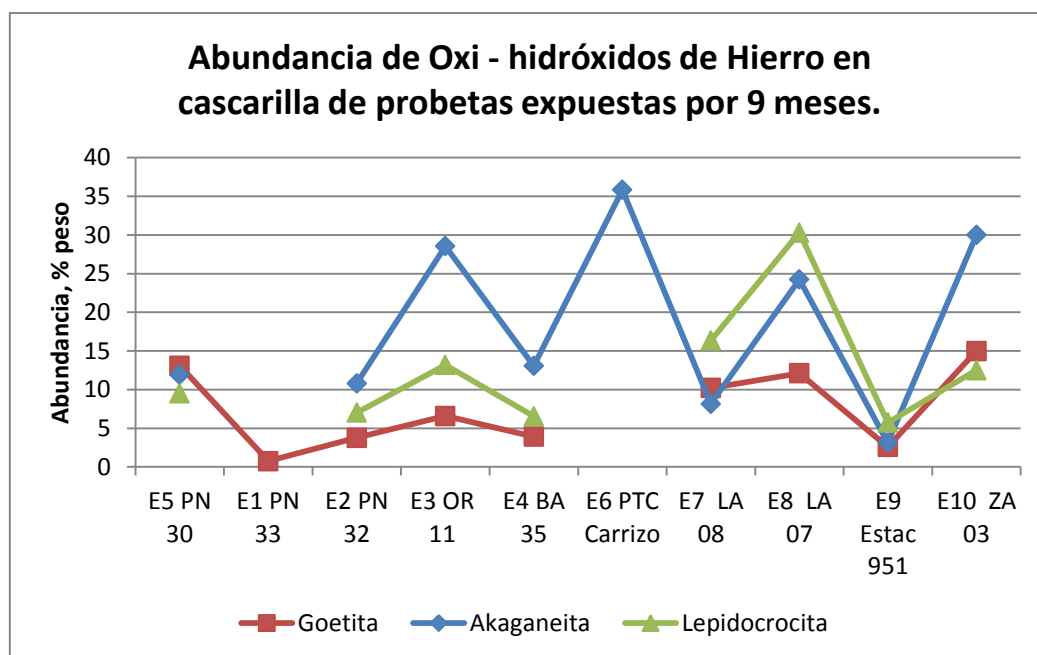


Figura 26. Abundancia de los oxihidróxidos de hierro en las probetas AISI/SAE 1020 expuestas por 9 meses.

Tal como esperábamos, solo en las probetas de ubicaciones cercanas al mar se aprecia la presencia de sales NaCl , MgCO_3 , CaCO_3 , CaSO_4 precipitadas debido a fenómenos de evaporación del agua. Ver Tabla 14 y Figura 27.

Solo en una estación hemos identificado un derivado de azufre, FeS_2 , sin embargo este debe provenir del suelo circundante. No hemos detectado sustancias que sean productos de corrosión por acción de óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno, lo cual es coherente con los resultados de análisis de la polución del aire, estos reportan ausencia de estas especies o presencia a niveles muy bajos.

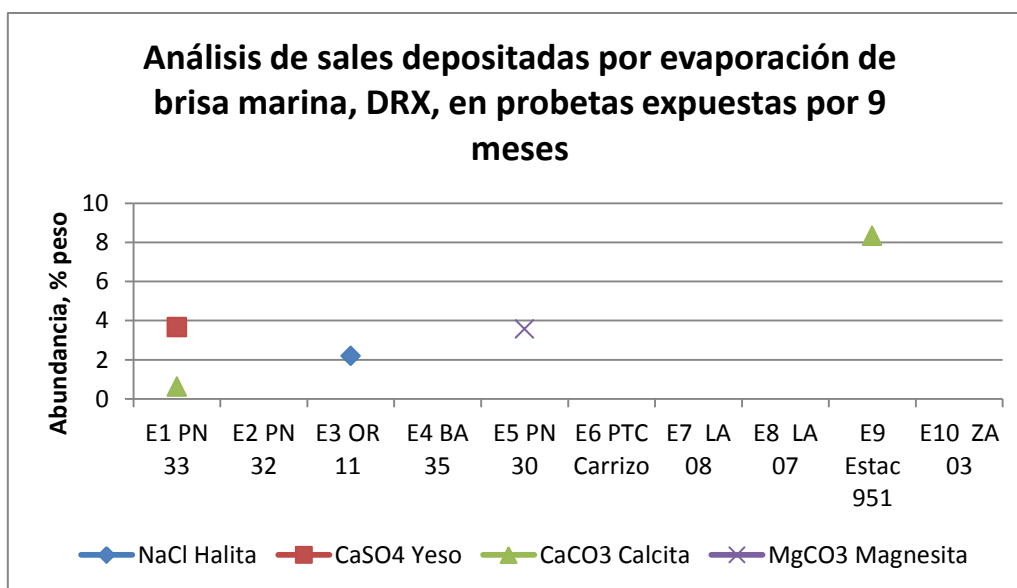


Figura 27. Sales depositadas presumiblemente por proceso de evaporación de la brisa marina. Estas sales se encontraron preferentemente en probetas de estaciones cercanas al mar.

La polución por sólidos, depositada en las probetas es diverso, sin embargo el cuarzo y solidos amorfos están presentes en todas ellas, ver figura 28

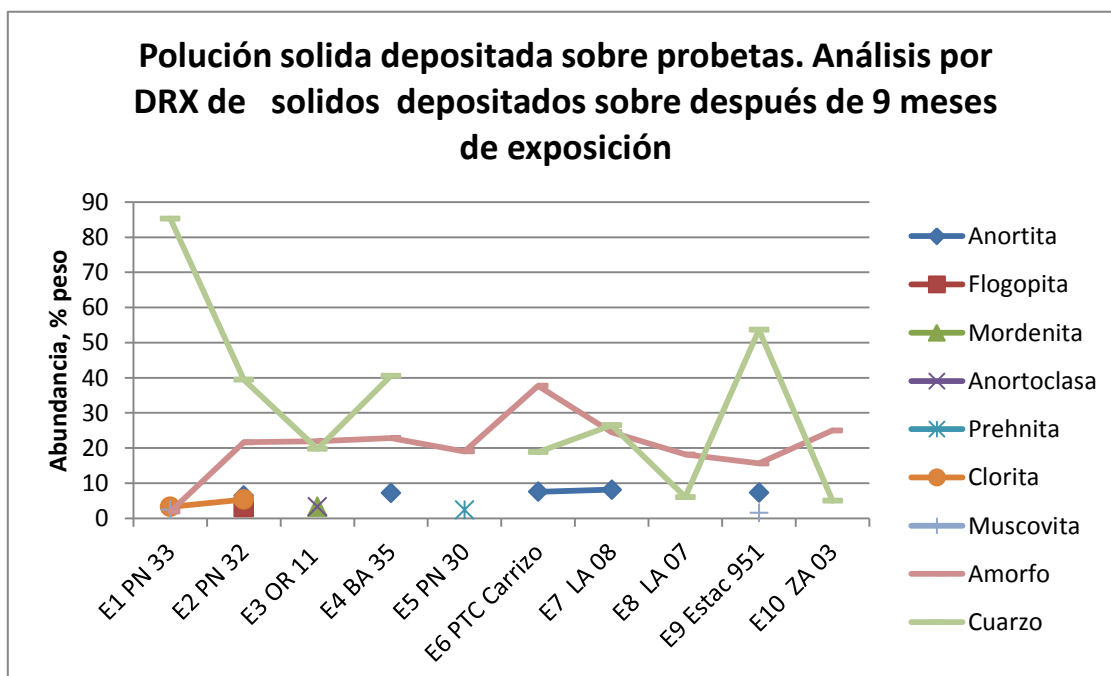


Figura 28. Sólidos ambientales transportados por el viento y encontrados en las probetas después de 9 meses de exposición.

Influencia de cloruros sobre la corrosión

A partir de los datos de velocidad promedio de deposición de cloruros determinados según la norma ISO 9223 mostrados en la Tabla 16 y la correspondiente velocidad de corrosión en probetas de acero AISI/SAE 1020 y ASTM A36, elaboramos la figura 29 que a continuación se muestra. En ella se muestra la íntima relación que hay entre la velocidad de corrosión y el contenido de cloruros en la atmosfera.

Las curvas de ajuste corresponden a una ecuación polinómica de 3er. orden.

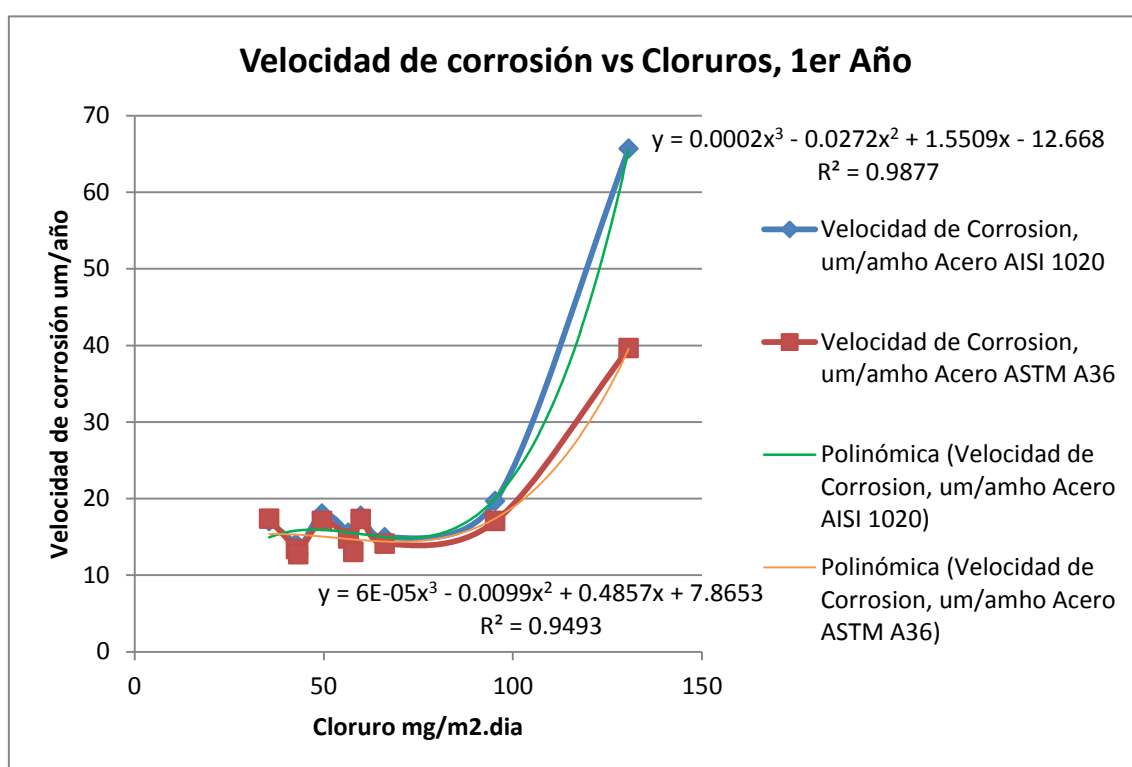


Figura 29. Velocidad de corrosión atmosférica de probetas de acero AISI/SAE 1020 y ASTM A36 versus cloruros, mg/m².día, en el Lote X.

De acuerdo con los resultados exhibidos, los ambientes del Lote X que reportan hasta una velocidad de deposición de Cloruros menor a 100 mg/m².día, tienen categoría de corrosividad C2.

Los resultados de cloruros medidos en el periodo del 9 de setiembre del 2010 al 14 de octubre del 2011 (figura 30) muestran una importante relación directa con la velocidad del viento. Apreciamos una relación estacional; la velocidad

del viento es usualmente mayor en el periodo de Agosto a Octubre. Daisy Gonzáles en su estudio sobre corrosión atmosférica en Moquegua y Tacna (21) hace hincapié a la influencia del viento sobre la corrosión atmosférica y Eusebio Dionicio en su estudio de la corrosión de materiales en atmósferas de Lima (21), menciona que en el periodo de junio a octubre de 1981 la corrosividad fue mayor que en el periodo octubre a enero de 1982.

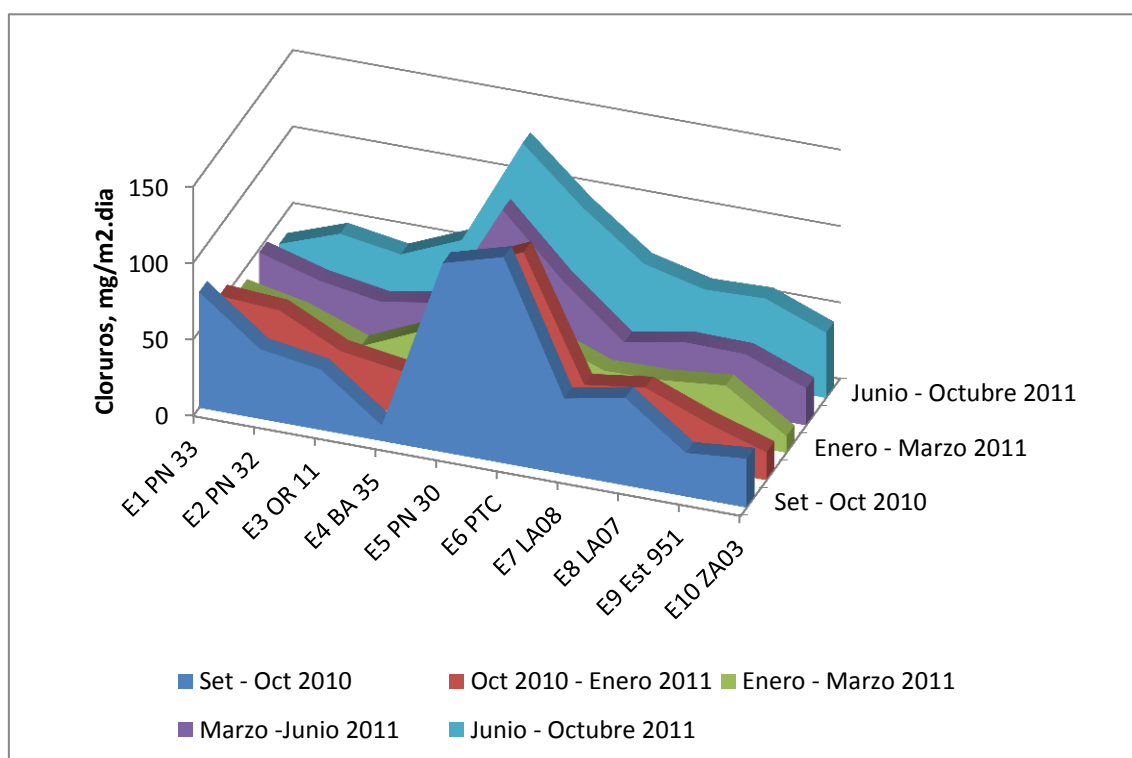


Figura 30. Comportamiento de los cloruros en la atmosfera de las estaciones estudiadas durante el 1er año del estudio.

Influencia de la humedad sobre la corrosión

De acuerdo a la norma ISO 9223, el clima en el Lote X es seco, clasificación t_3 , $3 < t \leq 30$, ver tabla 3. Sin embargo, de tres estaciones estudiadas, la estación E2 reporta la mayor humedad, atribuida a su cercanía al mar, aunque blindada parcialmente por cerros.

La humedad en la estación E5 – PN30 y E6 - PTC, también ha sido medida puntualmente con un psicómetro, de acuerdo a la norma ASTM E 337. Como se detalla en la figura 31, la humedad relativa es mayor en la estación E5 – PN

30, cercana al mar, respecto a la estación E6 – PTC distante 5900 metros del mar y ubicada a 178 metros de altitud.

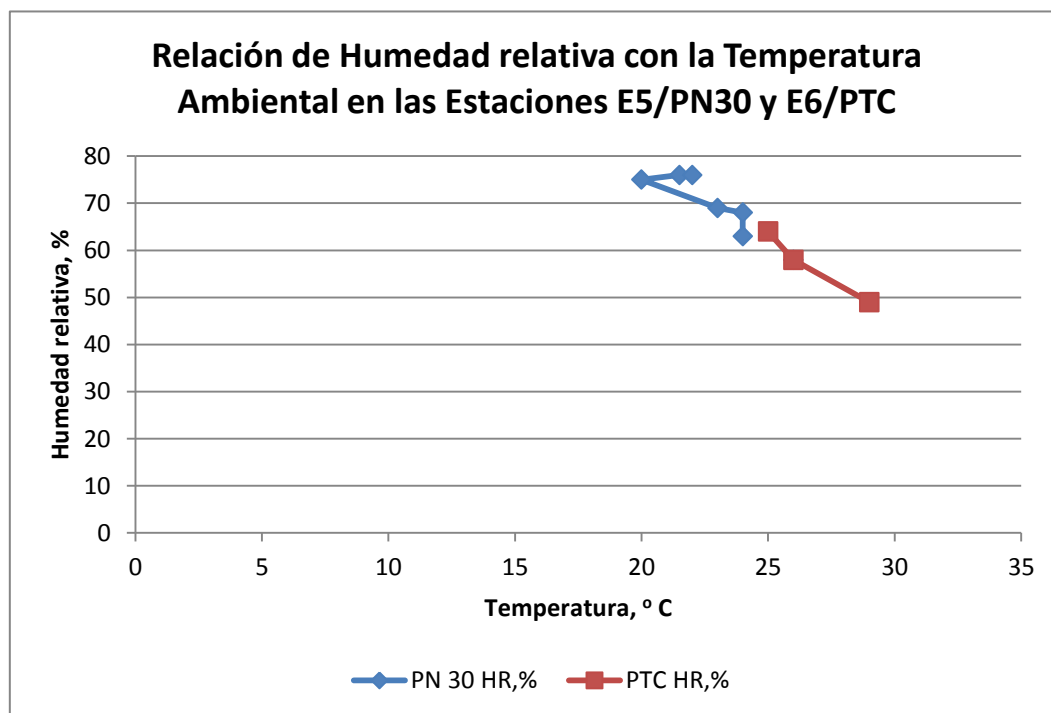


Figura 31. Relación de mediciones de humedad relativa vs. temperatura ambiental en las estaciones E5 y E6. La estación E5 está ubicada en la batería PN 30 y la estación E6 en la Planta de Tratamiento de Crudo (PTC).

Siendo la corrosión atmosférica un proceso electroquímico, la velocidad de corrosión estará fuertemente influenciada por la película de agua y sus iones disueltos. Esto explica la alta corrosividad de los ambientes cercanos al Mar en el Lote X. De acuerdo a lo observado en la Figura 31, la humedad crítica en áreas cercanas al mar y despejadas es alrededor de 70%.

6. CONCLUSIONES

Sumariamente, como conclusión de este estudio de tesis, podemos decir que en el Lote X la corrosión atmosférica es causada por la acción del oxígeno atmosférico e influenciado por la humedad, salinidad ambiental y por la capacidad del viento para transportar la brisa del mar al continente y polución sólida.

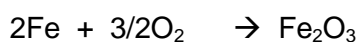
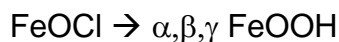
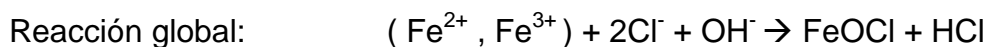
Los principales productos de corrosión son oxihidróxidos de hierro, akaganeita, lepidocrocita y goethita. La corrosión es influenciada por los cloruros de una manera polinómicas para los dos tipos de metal evaluados. Los gases contaminantes como SO₂, H₂S, NO₂, no influyen en los fenómenos de corrosión, esto se verifica por la ausencia de productos de corrosión que comprometan la participación de estas sustancias. Las áreas próximas al mar y de libre circulación del viento favorecen la corrosión atmosférica y son categorizadas como ambientes de corrosión alta, categoría C4, para acero AISI/SAE 1020 y corrosión media, categoría C3, para acero ASTM A36. Para el resto de áreas la corrosión de ambos materiales es baja, categoría C2. Esto último es congruente con el hecho de que climas caracterizados por temperaturas medias elevadas, bajas humedades relativas y precipitaciones muy escasas, corresponden a un régimen climático desértico en el cual el tiempo de humectación de la superficie metálica es corto y por tanto dan origen a velocidades de corrosión extremadamente bajas. La humedad crítica en ambientes cercanos al mar y despejados es alrededor de 70%.

También podemos concluir que el acero ASTM A36 es de mayor resistencia a la corrosión atmosférica del Lote X que el acero especificado bajo norma AISI/SAE 1020, debido a que contiene manganeso, cobre y silicio y además su superficie es menos rugosa.

Reacciones químicas.

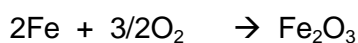
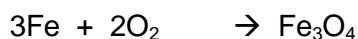
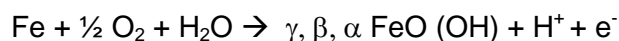
En ambiente cercano al mar

Reacción anódica: $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$

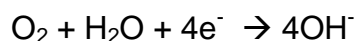


En ambiente lejano al mar

Reacciones anódica:



Reacción catódica:



En ambientes de bajo contenido de Cl^{-} y poca humedad hemos apreciado que predomina la γ -FeOOH (lepidocrocita).

Influencia de gases polucionantes

No hemos observado corrosión influenciada por SO_2 , NO_2 , H_2S . Cabe señalar que los niveles de estos gases en el aire son bajos (ver Anexo 3).

Influencia de los cloruros

En general, en el Lote X la corrosión atmosférica es notablemente influenciada por los cloruros presentes en la atmosfera, observándose una relación polinómica de 3er orden para ambos aceros AISI /SAE 1020 y ASTM A36. Los

ambientes C2 reportan velocidades de deposición de cloruros menores a 100 mg/m².dia

Estacionalidad

La estacionalidad en el Lote X tipificada por la velocidad de los vientos afecta la velocidad de corrosión, cuanto más intensos son los vientos, el transporte de la brisa marina al continente aumenta y por consiguiente la corrosión se incrementa. Esto implica considerar que en este tipo de estudios, la velocidad de corrosión inicial será función de la estación en que se inicie. Este ensayo fue iniciado en setiembre, en plena temporada de vientos fuertes y por consiguiente en un ambiente de alta humedad y salinidad.

Profundidad de picadura en el tiempo

De acuerdo al análisis de profundidad de picadura en el tiempo, la velocidad de corrosión empieza a reducirse a partir de sexto mes de exposición. Cabe mencionar que no todos las picaduras crecen a la misma velocidad, hay picaduras que aún siguen creciendo en el segundo año aunque a una baja velocidad.

Ecuación general que correlaciona la velocidad de corrosión con el tiempo.

La ecuación general que correlaciona la velocidad de corrosión con el tiempo, medida por pérdida de peso, para el Lote X, es la siguiente.

$$C = A \cdot t^{-n}.$$

Dónde: t, es el tiempo de exposición de las probetas en días, y

C, es la velocidad de corrosión en $\mu\text{m/año}$

Los valores de A y n varían para cada estación y están relacionados a la humedad, cloruros y sólidos adsorbidos por la superficie.

La velocidad de corrosión atmosférica, medida al año de exposición, en áreas lejanas al mar (C2), del Lote X, es muy similar para aceros AISI 1020 y ASTM A36; sin embargo, en áreas cercanas al mar la velocidad de corrosión del AISI

/SAE 1020 es superior a la correspondiente al acero ASTM A36. Este resultado es atribuido a la diferente resistencia a la corrosión de estos materiales. El acero AISI/SAE 1020 no contiene Mn, Cu y Si en cambio el acero ASTM si los contiene. Por otro lado, siendo la corrosión un fenómeno superficial, la rugosidad juega un papel importante, por cuanto favorece la corrosión; en este sentido la superficie del acero AISI/SAE 1020 es más rugosa que la del acero ASTM A36.

Detalles de costra o cascarilla obtenidas en las probetas

La costra o cascarilla de productos de corrosión en ambientes C2 son delgadas y están fuertemente adheridos al metal; sin embargo, en ambientes cercanos al mar, la costra es porosa, gruesa y fácilmente retirable de la superficie de las probetas, esto explica por qué son menos protectoras y facilitan el proceso de corrosión.

En probetas de estaciones cercanas al mar, hemos identificado que la cara interna de la costra o cascarilla, en contacto con el metal tiene mayor abundancia de hierro, lo cual sugiere que la velocidad de corrosión al inicio ha sido alta.

Mapas de corrosión.

A partir de la información obtenida de velocidad de corrosión, al año de exposición; hemos elaborado los mapas de corrosión para los dos tipos de acero estudiados, AISI /SAE 1020 y ASTM A 36. Su valor es importante porque permite una rápida visualización de áreas de corrosividad críticas y no críticas, especialmente cuando se seleccionan materiales para construcción, selección de sistemas de pintura, selección de procedimientos de preparación de superficie para pintado, estimación de la vida operativa de instalaciones nuevas y antiguas.

Es indudable que el usuario de estos mapas debe reconocer que la presencia de microclimas pueden afectar severamente los resultados. Por ello, debe verificar las condiciones básicas como son la humedad y salinidad ambiental.

7. RECOMENDACIONES

- A partir de la categorización de la corrosión atmosférica, recomendamos preparar una política de control de la corrosión atmosférica en el Lote X, que este enmarcada dentro de la Normativa de PETROBRAS ENERGÍA PERÚ S.A. y también en conformidad con las Normas de Seguridad para el Transporte de Hidrocarburos por ductos señalados en el Anexo 1 del DS 081-2007 EM.
- Iniciar un programa de selección de sistemas de pinturas y aleaciones para ambientes categorizados como severamente corrosivos C4 y ambientes corrosivos moderados, C2. El desempeño de los sistemas de pintura debe ser monitoreado en al menos 2 años de estudio.
- Continuar el estudio de la corrosión atmosférica sobre probetas de acero ASTM A 36, efectuando mediciones de pérdida de peso, profundidad de picaduras y caracterización de productos de corrosión al tercer y cuarto año, con el propósito de determinar ecuaciones de velocidad de corrosión para este material.
- Estudiar la corrosión atmosférica sobre aceros galvanizados para determinar el uso de este material en instalaciones ubicadas en ambientes cercanos al mar.
- Estudiar el desempeño de recubrimientos orgánicos como alternativas de mitigación de la corrosión atmosférica en instalaciones ubicadas en ambientes cercanos al mar.
- Estudiar la corrosión atmosférica influenciada por microorganismos en las áreas cercanas al mar, mediante la microscopia electrónica y otras prácticas válidas para esta investigación, sobre probetas construidas con acero ASTM A 36.
- Consideramos que es necesario incorporar mejoras en el diseño de los bastidores que portan las probetas, por ejemplo:

- Evitar zonas que favorezcan la retención de humedad y presencia de celdas de aireación diferencial sobre las probetas expuestas.
- Las probetas deben estar a la misma altura del suelo. Probetas más próximas al suelo se cubrirán con mayor cantidad de sólidos y por tanto son más afectadas por la corrosión que las que estén a una mayor altura.
- Considerar que la cara de la probeta no expuesta directamente a la atmosfera, reporta menos afectación por corrosión que la cara expuesta.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

(1) Tomashov N.D. Theory of corrosion and protection of metals. New York (EEUU): MacMillan Co., 1966, p. 367.

(2) ISO 9223 Corrosion of Metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification. First Edition 1992-02-15

(3) ISO 9225 Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Measurements of pollution. First Edition 1992-02-15.

(4) API SPEC 5L Specification for Line Pipe. Forty- Fifth Edition; Effective date: July 1, 2013

(5) API 570 Piping Inspection Code: In-service Inspection, Rating, Repair, and Alteration of Piping Systems, Third Edition.2009-11-01

(6) National Association of Corrosion Engineering, NACE Basic Corrosion Course, Copyright 1970.

(7) S. SYED Atmospheric Corrosion of Materials Corrosion Research Group, Atomic Energy Research Institute, King Abdulaziz City for Science and Technology, P.O. Box 6086, Riyadh-11442, Saudi Arabia. Emirates Journal for Engineering Research, 11 (1), 1-24 (2006)

(8) Juan José Santana Rodríguez, Juan Emilio González, Estudio de la corrosión atmosférica de acero al carbono y sus productos de corrosión mediante el empleo de técnicas electroquímicas, difracción de rayos X y Microscopia electrónica. Juan Emilio González, Juan José Santana Rodríguez, Vector plus: miscelánea científico - cultural, N°. 25, 2005 , págs. 37-46.

www.fulp.ulpgc.es/files/webfm/File/web/.../vp25_05_articulo02.pdf

(9) Graedel T.E., Atmospheric Corrosion of Materials.pdf, 1996. Corros. Sci, 38:2153

www.scribd.com/doc/149293585/Atmospheric-Corrosion-of-Materials-pdf

- (10) Roberge P.R, 1999. Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill, USA. 58.
- (11) S. Rivero, B. Chico, D. de la Fuente y M. Morcillo. Corrosión atmosférica del acero bajo en carbono en un ambiente marino polar. Estudio del efecto del régimen de vientos. REVISTA DE METALURGIA, 43 (5) Septiembre- Octubre, 370-383, 2007 ISSN: 0034-8570 370
- (12) Bardgett, W E and Stanners, J F (1963) The Delhi Pillar-A study of the Corrosion Aspects. NML Technical Journal, 5 (1). pp. 24-30
- (13) R. Pizarro Cabrera, A Anaya Pajuelo, Ensayos para determinación de la corrosión de metales en diferentes ambientes de Lima y Callao. Revista Peruana de Química e Ingeniería Química © UNMSM. Facultad de Química e Ingeniería Química ISSN versión electrónica 1609-7599
- (14) Yuntai Ma, Ying Li *, Fuhui Wang. Corrosion of low carbon steel in atmospheric environments of different chloride content, State Key Laboratory for Corrosion and Protection, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Wencui Road 62, Shenyang 110016, China
- (15) Norma ISO/DIS 8407-1991 "Metals and Alloys – Procedure for removal of corrosion products from corrosion test specimens"
- (16) ASTM E337 - 02(2007) Standard Test Method for Measuring Humidity with a Psychrometer (the Measurement of Wet- and Dry-Bulb Temperatures)
- (17) Decreto Supremo No 003-2008- MINAM – Estándares para la calidad del Aire.
- (18) Eusebio Dionicio Padilla. Estudio de la corrosión de Materiales en atmósferas de Lima - Método ALCAN. Departamento Académico de Ingeniería Metalúrgica – UNMSM. Revista del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas. Volumen 2, No.4, 1999.
- (19) Daisy González Díaz y Héctor Vargas Cárdenas. Características Medio Ambientales y su Influencia en la corrosión atmosférica del Cable Guarda de la

Línea de Transmisión 220 KV Moquegua - Tacna de REDESUR S.A. Facultad de Ingeniería de Procesos. Departamento Académico de Ingeniería Metalúrgica y Materiales. Universidad Nacional de San Agustín. Arequipa - Perú. Convenio: Universidad Nacional de San Agustín - Red Eléctrica del Sur S.A.

(20) Juan A. Jaén¹ y Lilibeth de Araque Caracterización de los Productos de corrosión de Aceros al Carbono en el Clima Tropical Marino de Sherman (Provincia de Colon, Panamá) Dpto. de Química Física, CITEN, Lab. N° 105, Edificio de Laboratorios Científicos-VIP, Universidad de Panamá, ijaen@ancon.up.ac.pa. Laboratorio de Química y Física Aplicada, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.

(21) B. Chico, D. de la Fuente y M. Morcillo. Corrosión atmosférica de metales en condiciones climáticas extremas. Depto. de Ingeniería de Materiales, Degradación y Durabilidad; Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM), CSIC; Avda. Gregorio del Amo, 8 28040-Madrid

digital.csic.es > ... > (CENIM) Artículos

(22) Facultad de Química Física, Universidad de Alicante, Corrosión Atmosférica Tema 8.

<http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8234/1/CorrTema8.pdf>

(23) Gerhard Ertl, Reactions at Solid Surfaces, a John Wiley & Sons Inc, Publication, 2009.

(24) J.C. Scully, Fundamentos de la Corrosión, Editorial Alhambra S.A. 1968.

(25) M. Yamashita, H.Miyuki- otros, The long term growth of the protective rust layer formed on weathering steel by atmospheric corrosion during a quarter of a century. Research and Development Center, Sumitomo Metal Industries Ltd, Amagasaki-660, Japan. Department of Materials Science and Engineering, Muroran Institute of Technology, Muroran-050, Japan

[www.sciencedirect.com/science/.../0010938X949015\(26\)](http://www.sciencedirect.com/science/.../0010938X949015(26)) H. Nagano and ** M. Yamashita Formation of Corrosion Protective Rust on Steel Exposed to the Atmosphere Materials and Environments Lab. Inc. Mitsuwa Hitech Co. Ltd.

zkk.co.jp/reppdf/naga1108.pdf

(27) Long Hao , Sixun Zhang^c, Junhua Dong, Wei Ke , Atmospheric corrosion resistance of MnCuP weathering steel in simulated environments. State Key Laboratory for Corrosion and Protection, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Wencui Road 62, Shenyang 110016, China b College of Material and Metallurgy, Northeastern University, Wenhua Road 3, Shenyang 110004, China. Technical Centre of Laiwu Steel Group, Ltd., Changsheng Road 23, Laiwu 271104, China

www.sciencedirect.com/.../pii/S0010938X11004410

(28) C. Rémazeilles, Ph. Refait, On the formation of β -FeOOH (akaganéite) in chloride-containing environments. Laboratoire d'Etude des Matériaux en Milieux Agressifs, EA 3167, Université de La Rochelle, Bât. Marie Curie, Avenue Michel Crépeau, F-17042 La Rochelle Cedex 01, France. Corrosion Science , Volume 49 Issue 2, February 2007, Pages 844 – 857.

9. ANEXOS

Anexo 1.- Resultados de determinaciones de pérdidas de peso de probetas AISI/SAE 1020 durante un año de exposición.

Estación/ Probeta		Tiempo (días)	Pérdida de Peso (g/m ² /día)	Promedio pérdida de peso. (g/m ² /día)	Vel. Corr. (μm/año)	Promedio Vel. Corr. (μm/año)
E-1 PN 33	1A	50	1,37	1,40	63,72	64,99
	1B	50	1,42		65,93	
	1C	50	1,41		65,31	
	3A	120	0,77	0,78	35,95	36,37
	3B	120	0,80		36,98	
	3C	120	0,78		36,19	
	6A	189	0,56	0,57	25,93	26,23
	6B	189	0,57		26,42	
	6C	189	0,57		26,35	
	9A	286	0,41	0,41	18,83	18,84
	9B	286	0,41		19,17	
	9C	286	0,40		18,52	
	12A	210	0,30	0,37	13,82	17,01
	12B	210	0,56		25,93	
	12C	210	0,24		11,29	
E-2 PN 32	1A	50	1,21	1,23	56,00	57,25
	1B	50	1,27		59,05	
	1C	50	1,22		56,69	
	3A	120	0,76	0,76	35,24	35,41
	3B	120	0,76		35,16	
	3C	120	0,77		35,82	
	6A	189	0,55	0,56	25,61	26,03
	6B	189	0,56		26,21	
	6C	189	0,57		26,26	
	9A	286	0,46	0,47	21,48	21,79
	9B	286	0,48		22,07	
	9C	286	0,47		21,81	
	12A	399	0,38	0,39	17,82	18,01
	12B	399	0,39		18,14	
	12C	399	0,39		18,06	

E-3 OR 11	1A	69	0,53	0,55	24,84	25,67
	1B	69	0,57		26,54	
	1C	69	0,55		25,63	
	3A	138	0,42	0,46	19,6	21,23
	3B	138	0,48		22,44	
	3C	138	0,47		21,66	
	6A	235	0,32	0,33	14,66	15,15
	6B	235	0,33		15,31	
	6C	235	0,33		15,49	
	9A	349	0,31	0,31	14,45	14,38
	9B	349	0,32		14,7	
	9C	349	0,30		13,99	
	12A	349	0,26	0,28	12,24	12,93
	12B	349	0,29		13,38	
	12C	349	0,28		13,17	
E-4 BA 35	1A	50	0,73	0,75	33,88	34,76
	1B	50	0,77		35,68	
	1C	50	0,75		34,73	
	3A	119	0,59	0,59	27,26	27,27
	3B	119	0,59		27,62	
	3C	119	0,58		26,94	
	6A	187	0,36	0,49	16,76	22,63
	6B	187	0,56		25,87	
	6C	187	0,54		25,26	
	9A	285	0,36	0,36	16,53	16,47
	9B	285	0,36		16,58	
	9C	285	0,35		16,29	
	12A	399	0,38	0,38	17,56	17,71
	12B	399	0,39		18,24	
	12C	399	0,37		17,34	
E-5 PN 30	1A	43	2,82	2,73	130,77	126,63
	1B	43	2,72		126,16	
	1C	43	2,65		122,95	
	3A	114	1,9	1,82	88,07	84,41
	3B	114	1,87		87,06	
	3C	114	1,68		78,09	
	6A	183	1,64	1,56	76,29	72,38
	6B	183	1,64		76,05	
	6C	183	1,4		64,79	
	9A	280	1,45	1,45	67,43	67,28
	9B	280	1,6		74,19	
	9C	280	1,30		60,23	
	12A	394	1,38	1,41	64,24	65,67
	12B	394	1,53		70,86	
	12C	394	1,33		61,92	

E-6 PTC	1A	43	0,98	0,98	45,71	45,62
	1B	43	0,97		45	
	1C	43	0,99		46,15	
	3A	114	0,46	0,46	21,57	21,54
	3B	114	0,47		21,71	
	3C	114	0,46		21,33	
	6A	183	0,49	0,50	22,79	23,26
	6B	183	0,51		23,74	
	6C	183	0,5		23,25	
	9A	280	0,41	0,41	19,19	19,31
	9B	280	0,42		19,51	
	9C	280	0,41		19,24	
	12A	394	0,42	0,42	19,69	19,64
	12B	394	0,43		19,8	
	12C	394	0,42		19,43	
E-7 LA 08	1A	45	0,81	0,79	37,57	36,43
	1B	45	0,77		35,69	
	1C	45	0,78		36,04	
	3A	115	0,53	0,53	24,68	24,62
	3B	115	0,53		24,74	
	3C	115	0,53		24,43	
	6A	184	0,39	0,39	18,22	18,39
	6B	184	0,4		18,68	
	6C	184	0,39		18,26	
	9A	281	0,34	0,34	16,02	15,88
	9B	281	0,34		15,89	
	9C	281	0,34		15,72	
	12A	396	0,32	0,32	14,99	14,92
	12B	396	0,32		14,86	
	12C	396	0,32		14,91	

E-8 LA 07	1A	45	0,74	0,77	34,27	35,82
	1B	45	0,79		36,77	
	1C	45	0,79		36,43	
	3A	116	0,57	0,57	26,69	26,70
	3B	116	0,58		26,91	
	3C	116	0,57		26,5	
	6A	184	0,43	0,43	20,11	19,92
	6B	184	0,43		20,12	
	6C	184	0,42		19,54	
	9A	281	0,37	0,36	17,07	16,97
	9B	281	0,36		16,94	
	9C	281	0,36		16,9	
E-9 Est 951	12A	396	0,34	0,34	15,73	15,54
	12B	396	0,33		15,26	
	12C	396	0,34		15,62	
	1A	43	0,69	0,70	31,83	32,35
	1B	43	0,69		32	
	1C	43	0,72		33,21	
	3A	113	0,63	0,65	29,22	29,96
	3B	113	0,65		30,11	
	3C	113	0,66		30,55	
	6A	182	0,37	0,36	17,02	16,81
	6B	182	0,36		16,67	
	6C	182	0,36		16,74	
E-10 ZA 03	9A	280	0,31	0,30	14,23	14,04
	9B	280	0,30		13,93	
	9C	280	0,30		13,97	
	12A	393	0,30	0,30	13,92	14,15
	12B	393	0,30		14,09	
	12C	393	0,31		14,43	
	1A	44	0,7	0,70	32,4	32,27
	1B	44	0,69		32,05	
	1C	44	0,7		32,37	
	3A	115	0,53	0,54	24,5	24,79
	3B	115	0,53		24,46	
	3C	115	0,55		25,41	
	6A	183	0,39	0,38	17,9	17,78
	6B	183	0,38		17,72	
	6C	183	0,38		17,71	
	9A	280	0,31	0,31	14,32	14,38
	9B	280	0,31		14,35	
	9C	280	0,31		14,48	
	12A	395	0,30	0,30	13,9	14,04
	12B	395	0,30		14,1	
	12C	395	0,30		14,12	

Anexo 2.- Velocidad de crecimiento de profundidad de la corrosión localizada en aceros AISI/SAE 1020 y ASTM a 36.

Profundidad de corrosión localizada medida con Medidor de Perfil de Superficie Elcometer 123.					
Estación / Material	Tiempo de exposición, años	Profundidad mínima, mils	Profundidad máxima, mils	Velocidad de Crecimiento Mínima Profundidad de Picadura, $\mu\text{m/año}$	Velocidad de Crecimiento Máximo Profundidad de Picadura, $\mu\text{m/año}$
Estación E1					
AISI 1020	0.52	1.2	4.5	58.62	219.81
AISI 1020	0.78	1.1	3.2	35.82	104.21
ASTM A36	0.76	0.2	1.0	6.68	33.42
Estación E2					
AISI 1020	0.52	0.8	6.2	39.08	302.85
AISI 1020	0.78	1.4	14.3	45.59	465.67
AISI 1020	1.09	1.2	3.5	27.96	81.56
ASTM A36	1.09	0.5	6.6	11.65	153.80
Estación E3					
AISI 1020	0.19	0.5	6.7	66.84	895.68
AISI 1020	0.38	1.1	11.2	73.53	748.63
AISI 1020	0.64	1.2	4.8	47.63	190.50
AISI 1020	0.96	2.3	4.8	60.85	127.00
ASTM A36	0.96	0.1	1.8	2.65	47.63
Estación E4					
AISI 1020	0.52	1	3.4	48.85	166.08
AISI 1020	1.09	1.6	3.4	37.28	79.23
ASTM A36	1.09	0.8	1.8	18.64	41.94
Estación E5					
AISI 1020	0.52	1.6	9	78.15	439.62
AISI 1020	1.09	12	HUECO		
ASTM A36	1.09	0.5	5.8	11.65	135.16
Estación E6					
AISI 1020	0.50	0.5	2.3	25.40	116.84
AISI 1020	0.77	0.6	3.2	19.79	105.56
AISI 1020	1.08	1	3.2	23.52	75.26
ASTM A36	1.08	0.4	2.2	9.41	51.74
Estación E7					
AISI 1020	0.77	0.6	1.8	19.79	59.38
AISI 1020	1.08	1.2	3.4	28.22	79.96
ASTM A36	1.08	0.3	1.5	7.06	35.28
Estación E8					
AISI 1020	0.50	1.2	2.2	60.96	111.76
AISI 1020	0.77	1.6	3.2	52.78	105.56
AISI 1020	1.08	1.2	3.2	28.22	75.26
ASTM A36	1.08	0.7	1.7	16.46	39.98
Estación E9					
AISI 1020	0.50	0.5	4.5	25.40	228.60
AISI 1020	0.77	0.7	3.2	23.09	105.56
AISI 1020	1.08	1	5.4	23.52	127.00
ASTM A36	1.08	0.6	1.6	14.11	37.63
Estación E10					
AISI 1020	0.50	0.8	4.4	40.64	223.52
AISI 1020	0.77	0.8	2.4	26.39	79.17
AISI 1020	1.08	1.2	4.5	28.22	105.83
ASTM A36	1.08	0.5	1.4	11.76	32.93

Anexo 3.- Variables ambientales

Estacion	Ubicación	Análisis Ambientales del 25 de Octubre a 19 de Noviembre del 2011									
		PM 2.5, ug/m ³	H ₂ S , ug/m ³	SO ₂ , ug/m ³	NO ₂ , ug/m ³	Velocidad de Viento,Km/h		Temperatura ° C		Humedad Relativa, %	
						Minimo	Maximo	Minima	Maxima	Minima	Maxima
E5	PN 30	12	0,9	2,0	2,6	0	14,0	18,1	33,0	61	99
E1	PN 33	12	0,4	1,9	2,5	0	16,4	20,1	32,9	61	99
E2	PN 32	15	0,6	2,6	3,4	0	15,0	17,9	32,6	61	99
E3	OR 11	10	0,9	3,0	1,6	0	30,6	19,0	30,0	57	78
E4	BA 35	15	0,4	2,0	1,0	0	18,0	19,7	32,8	61	99
E6	PTC	13	0,6	2,1	1,1	0	31,0	18,5	31,0	51	79
E7	LA 08	10	0,9	3,9	2,1	0	30,6	19,0	32,6	60	91
E8	LA 07	10	0,4	1,9	0,7	0	30,6	19,0	32,6	61	99
E10	ZA 03	10	0,4	1,6	0,8	0	21,0	20,1	33,2	61	99

De acuerdo a la norma ISO 9223, la polución por SO₂ es Po, mínima categoría.

Anexo 4.- Imágenes de probetas AISI/SEA 1020 después de estar expuestas por 285 (izquierda) y 398 días (derecha) respectivamente.

Figura 4.1. Estado de probeta, AISI /SAE 1020, de la estación E5 PN 30 después de 285 y 398 días de exposición.

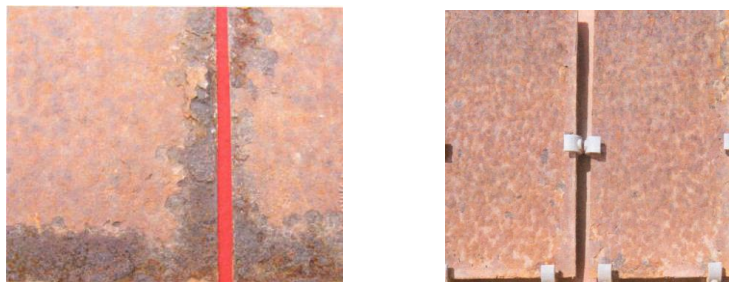


Figura 4.2. Estado de probetas, AISI/SAE 1020, de la estación E6 PTC, después de 285 días y 394 de exposición.

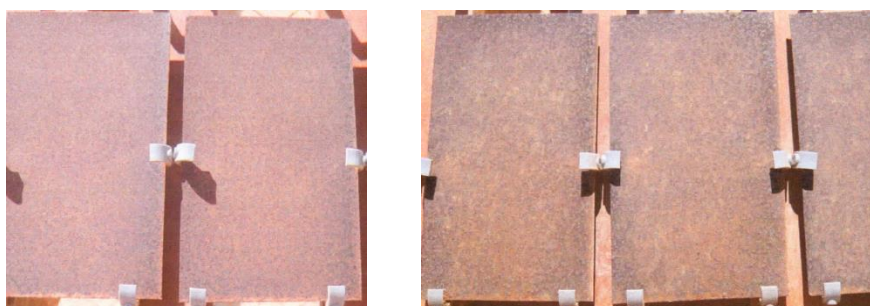
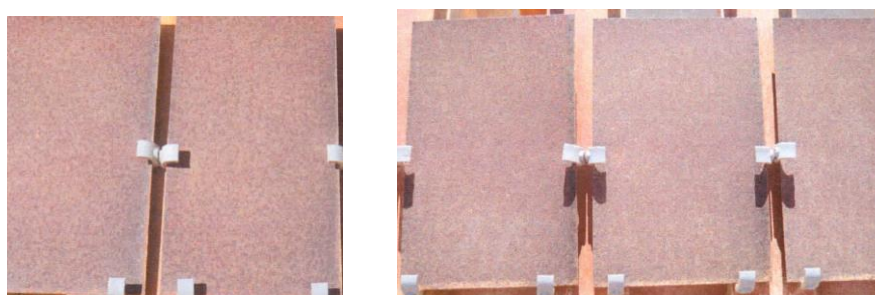
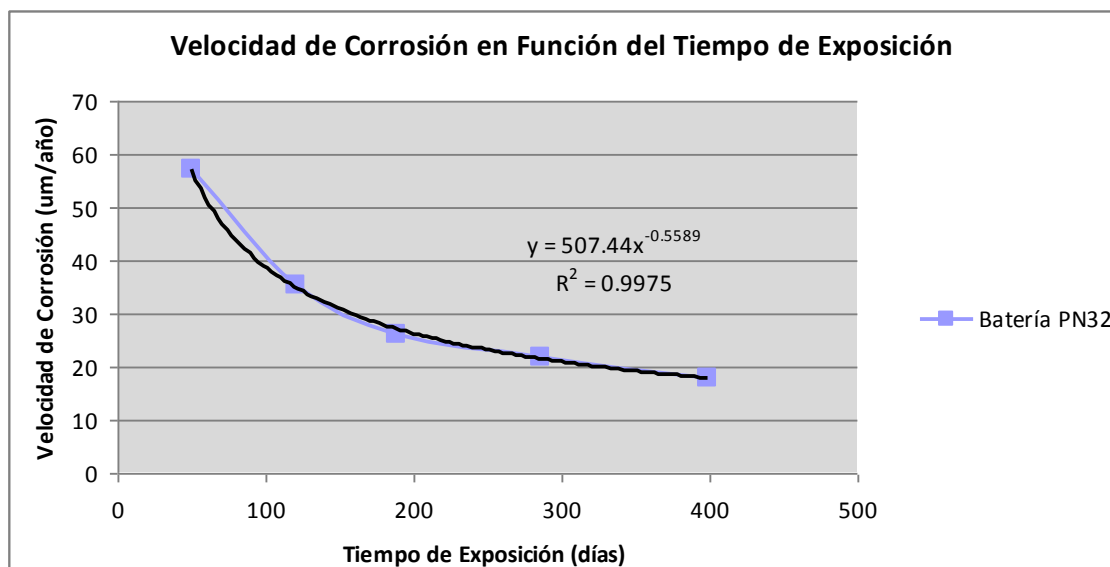
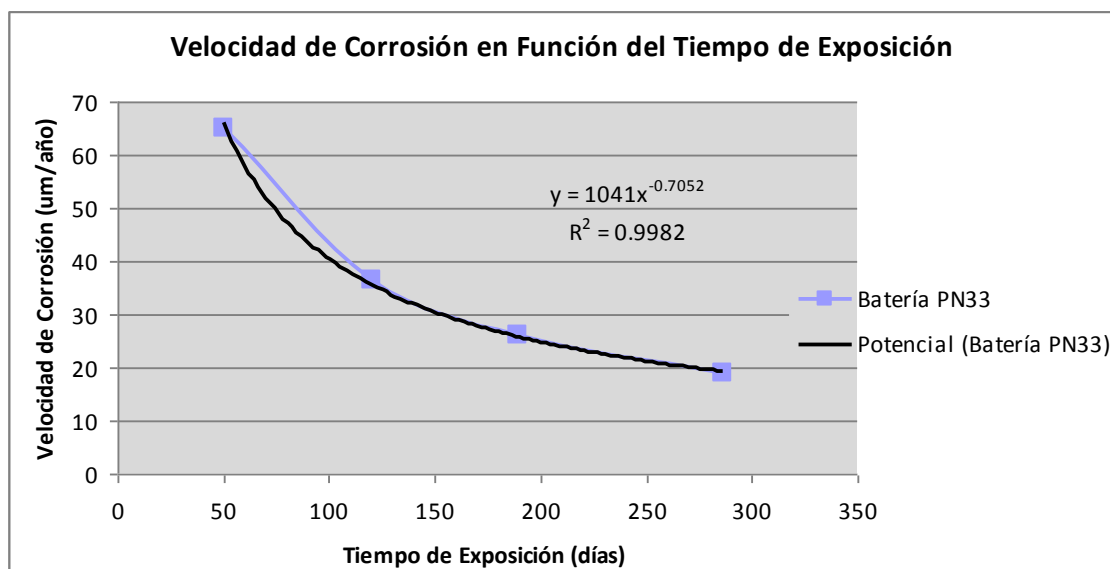


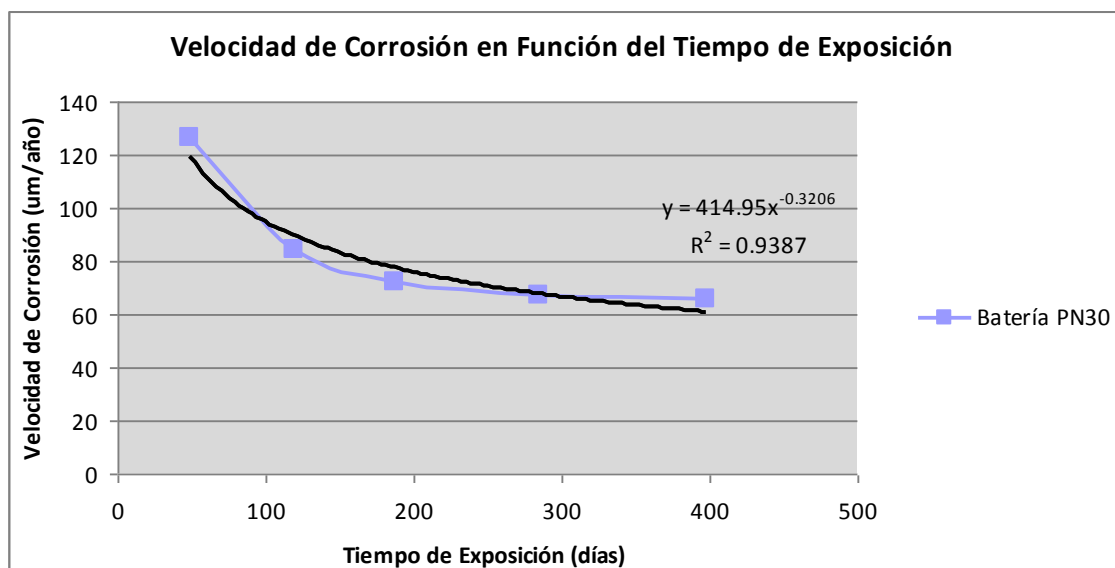
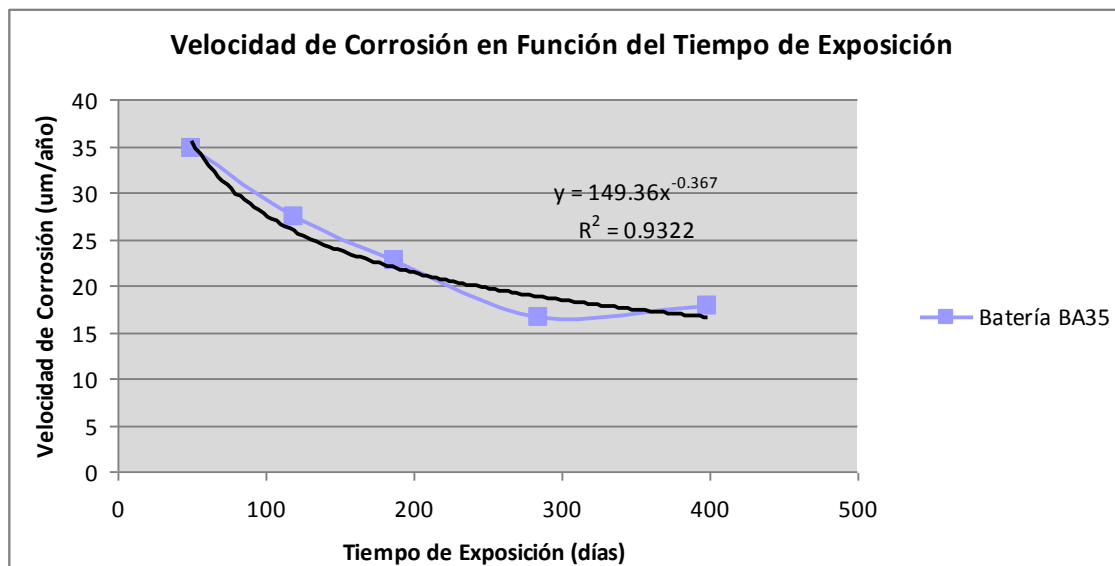
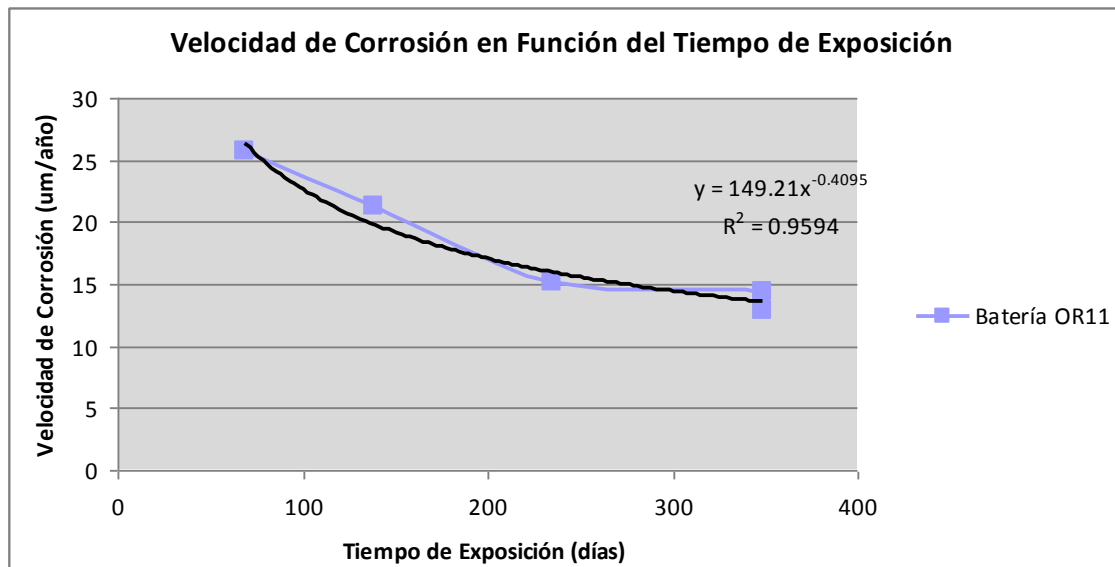
Figura 4.3. Estado de probetas, AISI /SAE 1020, de la estación E7, después de 285 y 396 días de exposición.

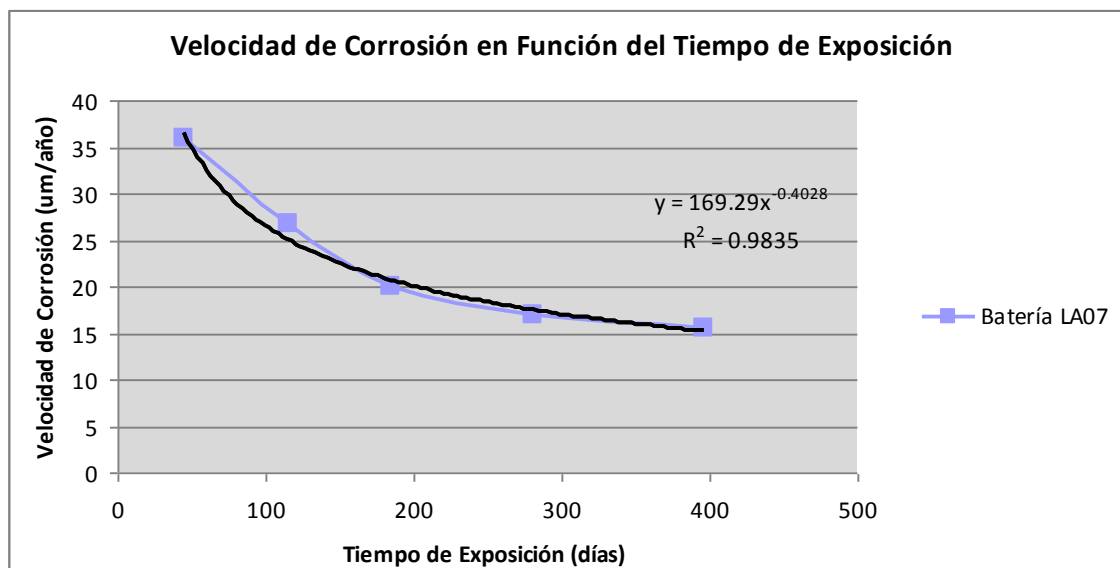
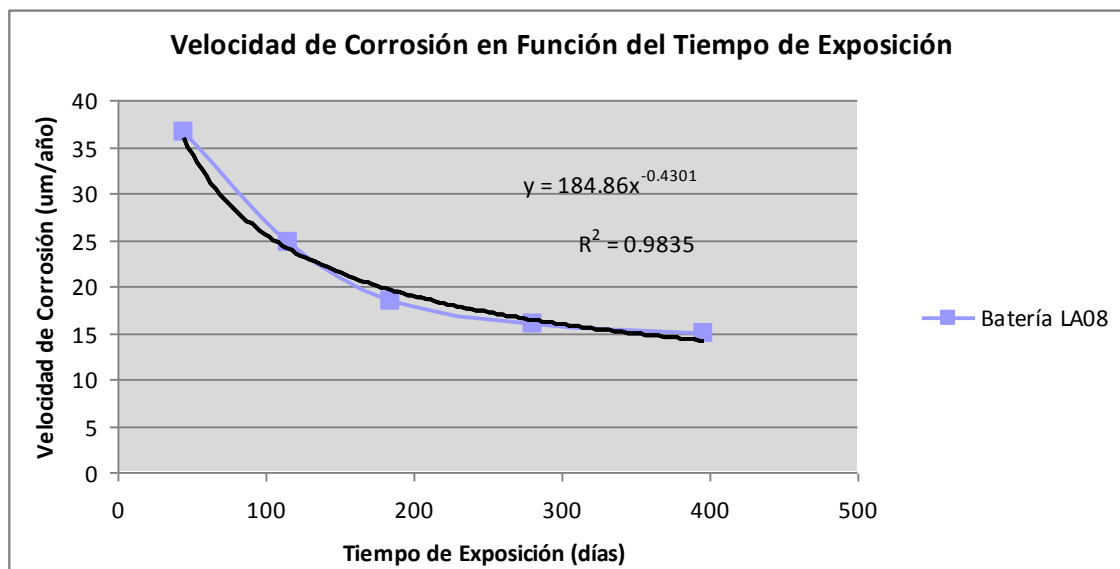
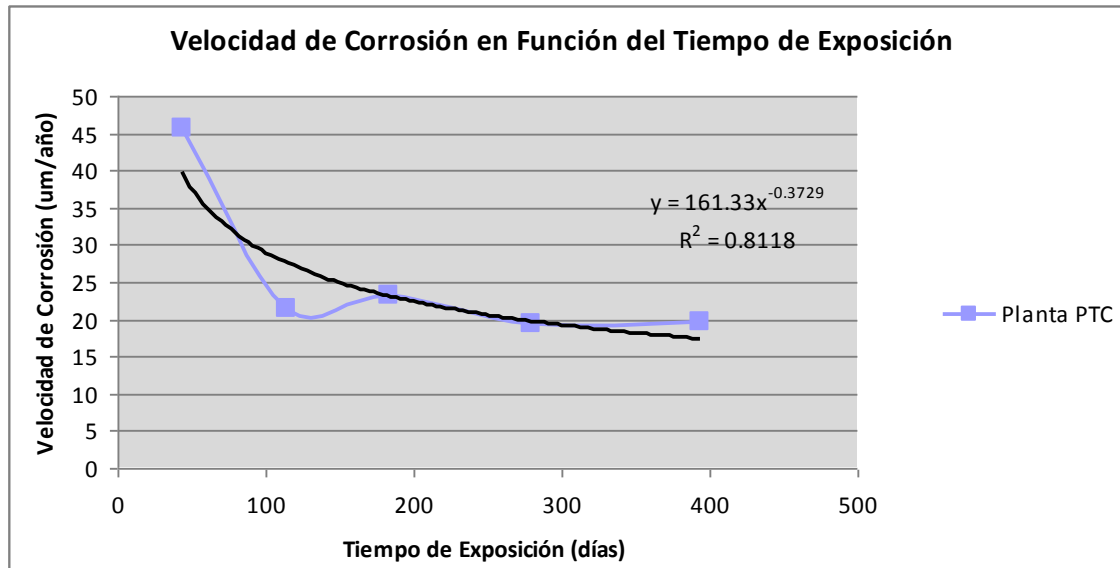


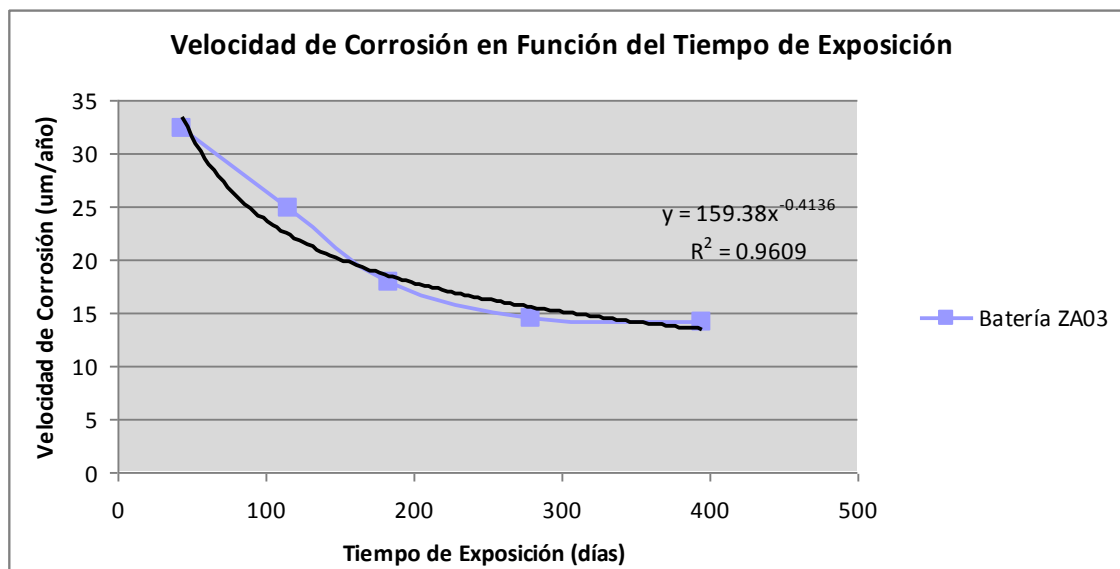
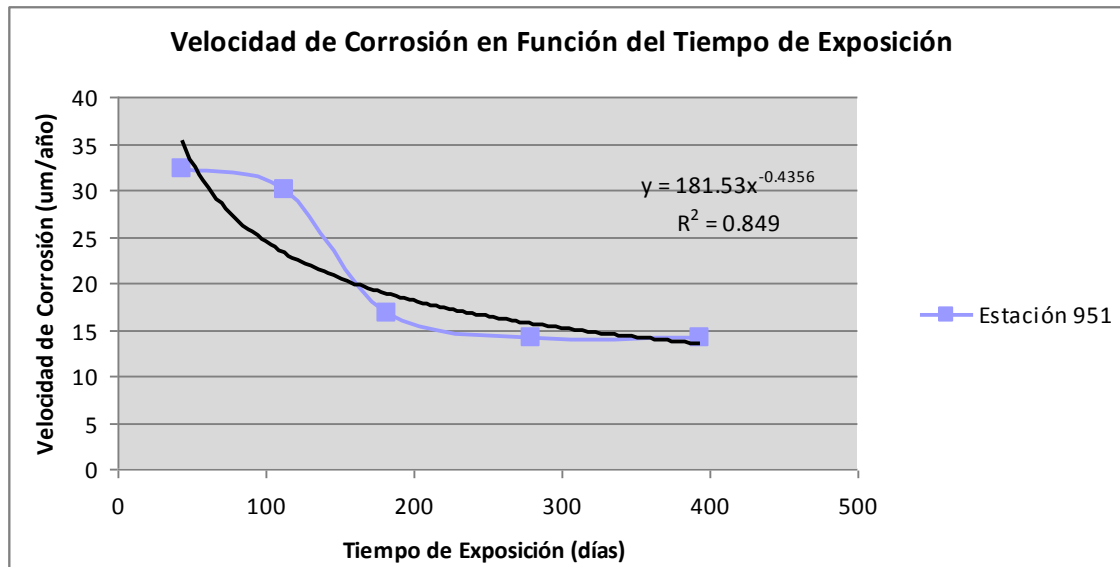
Anexo 5.- Curvas de velocidad de corrosión atmosférica de probetas AISI/SEA 1020 después de un año de exposición en las 10 estaciones estudiadas.

A continuación se muestran las curvas de corrosión atmosférica para cada una de las 10 estaciones estudiadas.









Anexo 6.- Difractogramas de sólidos depositados en las probetas AISI/SEA 1020 después de 9 meses de exposición

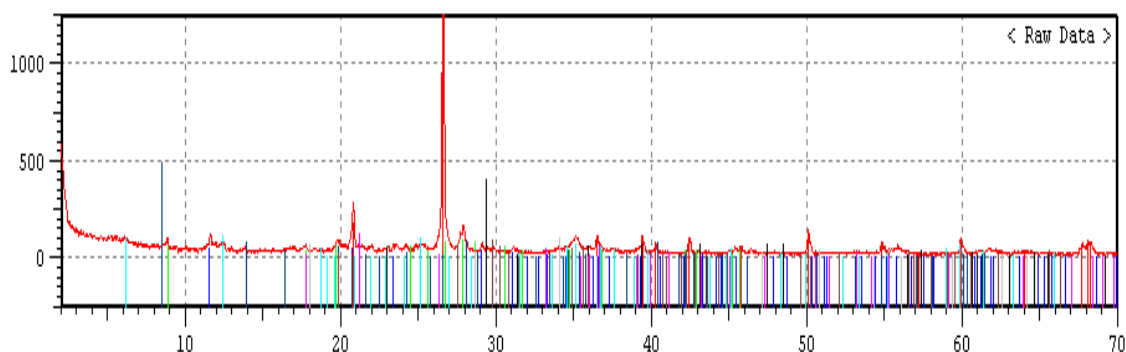
Estos analizados fueron realizados en el Laboratorio de INGEMMET con un Difractometro marca SHIMADZU Modelo XRD – 6000el 26 de Julio del 2011.

Tabla Resumen de solidos depositados en las probetas. Las cantidades expresan el contenido porcentual.

Nombre	Formula	E1 PN 33	E2 PN 32	E3 OR 11	E4 BA 35	E5 PN 30	E6 PTC	E7 LA 08	E8 LA 07	E9 Est 951	E10 ZA 03
Cuarzo	SiO ₂	85,32	39,47	19,78	40,52		18,87	26,53	6,06	53,65	5,00
Yeso	CaSO ₄	3,67									
Clorita	(Mg,Al,Fe) ₆ (SiAl) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	3,29	5,40								
Muscovita	(K,Ca,Na)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	2,53								1,56	
Amorfo		1,90	21,62	21,98	22,88	19,05	37,73	24,49	18,18	15,63	25,00
Oxi Hidroxidos de Hierro	Fe ⁺³ O(OH)	0,76	21,62	48,34	23,53	34,53	35,85	34,70	66,67	11,46	57,50
Calcita	CaCO ₃	0,63								8,33	
Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈		6,49		7,19		7,55	8,16		7,29	
Flogopita	KMg ₃ (AlSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂		3,24								
Mordenita	(Na ₂ ,Ca,K ₂) ₄ (Al ₈ Si ₄₀)O ₉₆ .28 H ₂ O			3,30							
	Anortoclasa			3,30							
Halita	NaCl			2,20							
Magnesioferrita	Mg(Fe ³⁺) ₂ O				5,88	33,33					
Hematita	Fe ₂ O ₃					7,14		6,12			12,50
Magnesita	Mg CO ₃					3,57					
Prehnita	(Si ₃ O ₁₀)Ca ₂ Al ₂ (OH) ₂					2,38					
Pirita	FeS ₂								9,09		

Estación E1

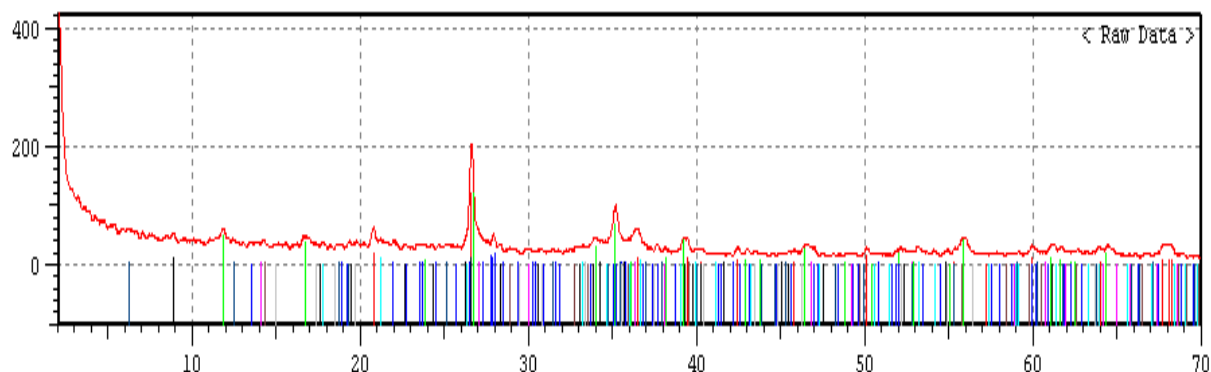
Range [upName] ORD EXT-2011 [DataName] OT 012-11 E1 [Date/Time] 07-25-11 09:12:12



No	Card	Chemical Formula	Chemical Name	Mineral Name
1	46-1045	SiO ₂	Silicon Oxide	Quartz
2	25-0649	(K,Ca,Na)(Al,Mg,Fe) ₂	Potassium Aluminum Silicat	Muscovite-2\ITM#
3	33-0311	CaSO ₄ .2H ₂ O	Calcium Sulfate Hydrate	Gypsum
4	29-0713	Fe ₃ O ₄ (OH)	Iron Oxide Hydroxide	Goethite
5	46-1323	(Mg,Al,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀	Magnesium Aluminum Iron Si	Clinocllore-1\IT
6	5-0586	CaCO ₃	Calcium Carbonate	Calcite
7	44-1481	Ca(OH) ₂	Calcium Hydroxide	Portlandite
8	29-0855	MgAlSi ₄ O ₁₀ (OH) ₂ .4H ₂ O	Magnesium Aluminum Silicat	Palygorskite
9	24-0203	Ca(Mg,Fe)Si ₂ O ₆	Calcium Iron Magnesium Sil	Augite

Estación E2

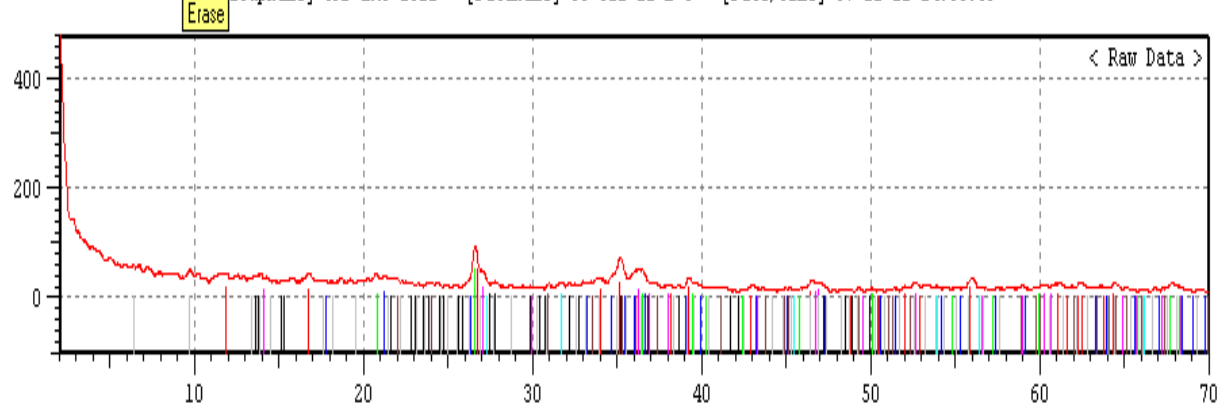
[GroupName] ORD EXT-2011 [DataName] OT 012-11 E 2 [Date/Time] 07-21-11 15:47:09



No	Card	Chemical Formula	Chemical Name	Mineral Name
1	46-1045	SiO ₂	Silicon Oxide	Quartz
2	34-1266	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Akaganeite-\ITM\
3	41-1486	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Calcium Aluminum Silicate	Anorthite
4	8-0098	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Lepidocrocite
5	29-0713	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Goethite
6	10-0495	KMg ₃ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂	Potassium Magnesium Alumin	Phlogopite-1\ITM
7	8-0237	WS ₂	Tungsten Sulfide	Tungstenite-2\IT
8	1-1059	Fe+3Cl ₃	Iron Chloride	Molysite
9	12-0242	(Mg,Al) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (Magnesium Aluminum Silicat	Clinocllore-1\IT

Estación 3

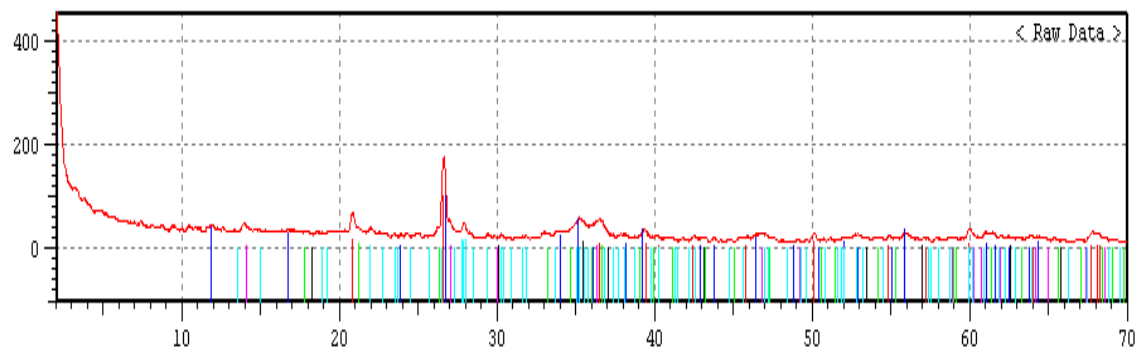
[GroupName] ORD EXT-2011 [DataName] OT 012-11 E 3 [Date/Time] 07-21-11 14:53:59



No	Card	Chemical Formula	Chemical Name	Mineral Name
1	34-1266	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Akaganeite-\ITM\
2	46-1045	SiO ₂	Silicon Oxide	Quartz
3	29-0713	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Goethite
4	44-1415	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Lepidocrocite
5	5-0628	NaCl	Sodium Chloride	Halite
6	6-0239	(Ca,Na ₂ ,K ₂)Al ₂ Si ₁₀ O ₂₂	Calcium Aluminum Silicate	Mordenite
7	9-0478	(Na,K)(Si ₃ Al) ₈ O ₂₀	Potassium Sodium Aluminum	Anorthoclase
8	36-0426	CaMg(CO ₃) ₂	Calcium Magnesium Carbonat	Dolomite

Estación E4

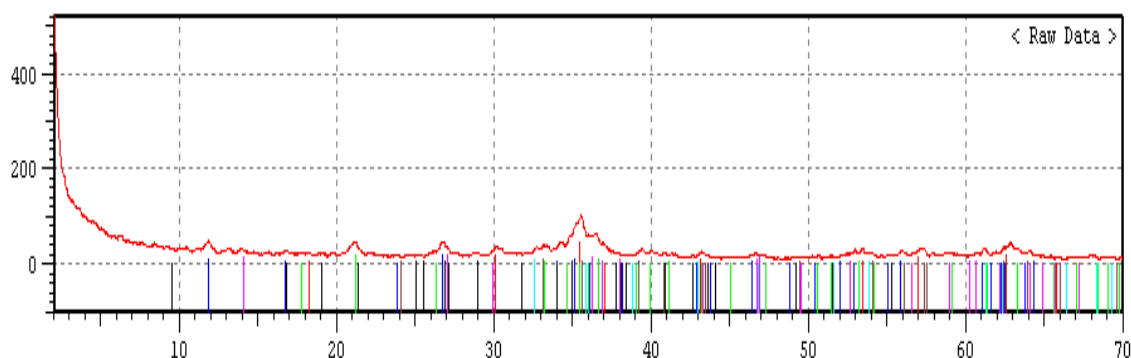
[GroupName] ORD EXT-2011 [DataName] OT 012-11 E 4 [Date/Time] 07-21-11 14:11:11



No	Card	Chemical Formula	Chemical Name	Mineral Name
1	46-1045	SiO ₂	Silicon Oxide	Quartz
2	8-0098	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Lepidocrocite
3	34-1266	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Akaganeite-\ITM\
4	29-0713	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Goethite
5	41-1486	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Calcium Aluminum Silicate	Anorthite
6	36-0398	MgFe ₂ +3O ₄	Magnesium Iron Oxide	Magnesioferrite

Estación E5

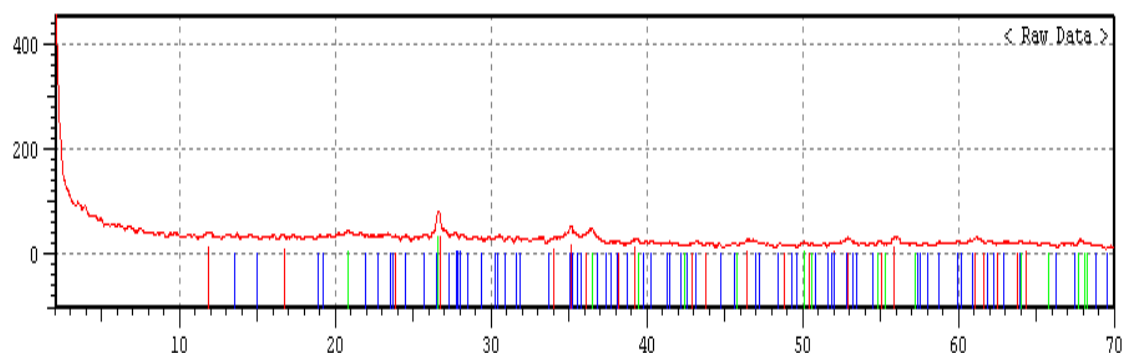
[GroupName] ORD EXT-2011 [DataName] OT 012-11 E 5 [Date/Time] 07-21-11 12:27:24



No	Card	Chemical Formula	Chemical Name	Mineral Name
1	36-0398	MgFe ₂ +3O ₄	Magnesium Iron Oxide	Magnesioferrite
2	29-0713	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Goethite
3	34-1266	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Akaganeite-\ITM\
4	44-1415	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Lepidocrocite
5	33-0664	Fe ₂ O ₃	Iron Oxide	Hematite
6	29-0290	Ca ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	Calcium Aluminum Silicate	Prehnite
7	8-0479	MgCO ₃	Magnesium Carbonate	Magnesite

Estación E6

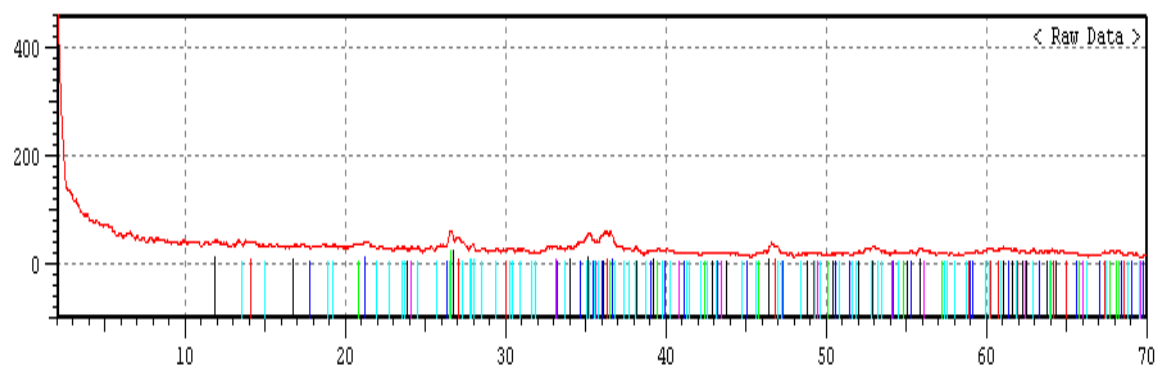
[GroupName] ORD EXT-2011 [DataName] OT 012-11 E 6 [Date/Time] 07-21-11 11:35:42



No	Card	Chemical Formula	Chemical Name	Mineral Name
1:	34-1266	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Akaganeite-\ITM\
2:	46-1045	SiO2	Silicon Oxide	Quartz
3:	41-1486	CaAl2Si2O8	Calcium Aluminum Silicate	Anorthite

Estación E7

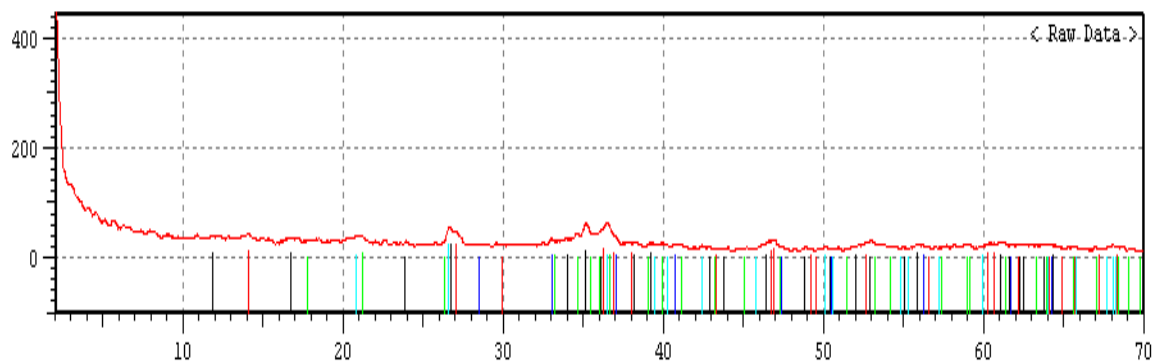
[GroupName] ORD EXT-2011 [DataName] OT 012-11 E 7 [Date/Time] 07-21-11 10:52:47



No	Card	Chemical Formula	Chemical Name	Mineral Name
1:	8-0098	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Lepidocrocite
2:	46-1045	SiO2	Silicon Oxide	Quartz
3:	29-0713	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Goethite
4:	33-0664	Fe2O3	Iron Oxide	Hematite
5:	41-1486	CaAl2Si2O8	Calcium Aluminum Silicate	Anorthite
6:	34-1266	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Akaganeite-\]

Estación E8

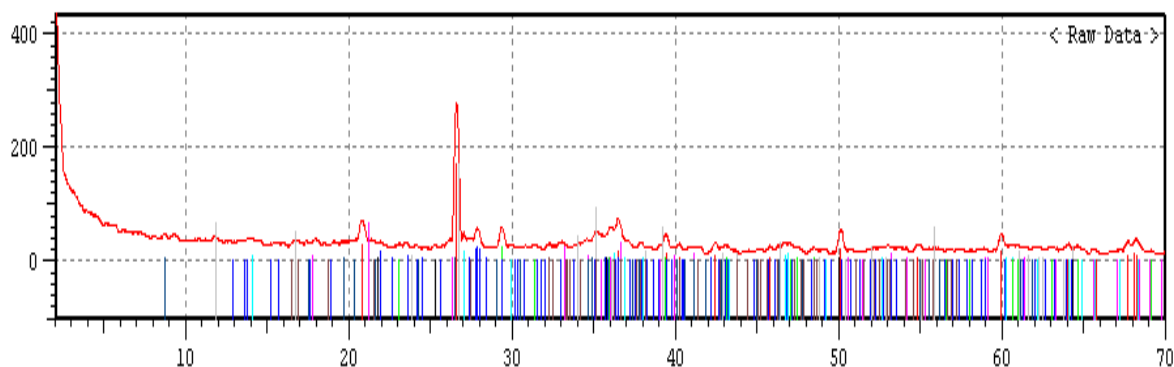
[GroupName] ORD EXT-2011 [DataName] OT 012-11 E 8 [Date/Time] 07-21-11 10:08:57



No	Card	Chemical Formula	Chemical Name	Mineral Name
1	44-1415	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Lepidocrocite
2	42-1340	FeS2	Iron Sulfide	Pyrite
3	29-0713	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Goethite
4	34-1266	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Akaganeite-\ITM\
5	46-1045	SiO2	Silicon Oxide	Quartz

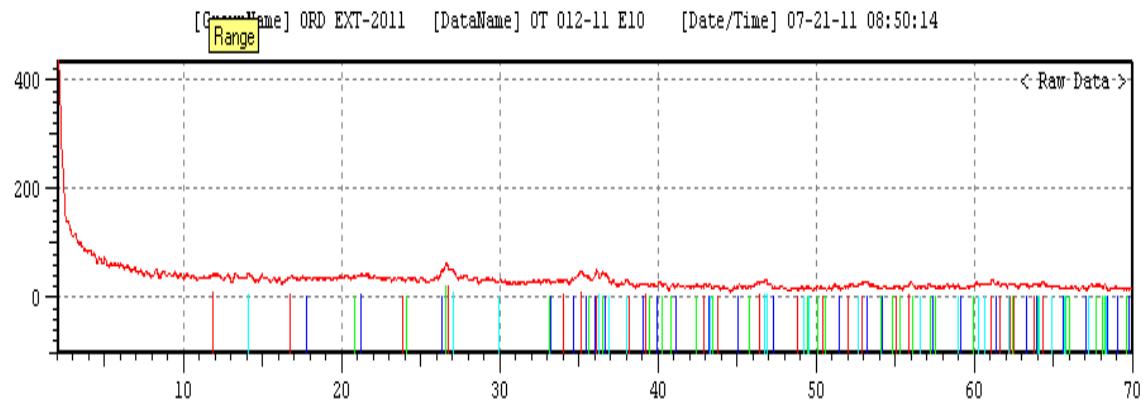
Estación E9

[GroupName] ORD EXT-2011 [DataName] OT 012-11 E 9 [Date/Time] 07-21-11 09:29:44



No	Card	Chemical Formula	Chemical Name	Mineral Name
1	46-1045	SiO2	Silicon Oxide	Quartz
2	44-1415	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Lepidocrocite
3	47-1743	CaCO3	Calcium Carbonate	Calcite
4	29-0713	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Goethite
5	20-0528	(Ca,Na)(Al,Si)2Si2O8	Sodium Calcium Aluminum Si	Anorthite
6	34-1266	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Akaganeite-\ITM\
7	7-0025	KAl2Si3AlO10(OH)2	Potassium Aluminum Silicat	Muscovite-1\ITM\
8	8-0448	Na2CO3.H2O	Sodium Carbonate Hydrate	Thermonatrite
9	14-0139	(Al,Fe)3(PO4,V04)2(O	Aluminum Iron Vanadium Oxi	Gutsevichite [NR

Estación 10



No	Card	Chemical Formula	Chemical Name	Mineral Name
	1:33-0664	Fe2O3	Iron Oxide	Hematite
	2:29-0713	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Goethite
	3:34-1266	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Akaganeite-\ITM\
	4:44-1415	Fe+3O(OH)	Iron Oxide Hydroxide	Lepidocrocite
	5:46-1045	SiO2	Silicon Oxide	Quartz

Anexo 7. Preparación de probetas de corrosión antes de ser instaladas

- 1.- Desengrasar la probeta sumergiéndola en acetona. Dejar remojando por 10 minutos. Retirarlo cuidadosamente con pinza metálica de acero 316 y ponerlo en una luna de vidrio hasta secarlo a condiciones atmosféricas. Este trabajo efectuarlo dentro de una campana de extracción.
- 2.- Inmersión de la probeta del paso 1, en un baño de decapado ácido a temperatura ambiente y dentro de la campana extractora. El tiempo de exposición es 4 minutos.
- 3.- Retiro de la probeta del baño de decapado químico.
- 4.- Inmersión de la probeta en solución de carbonato de sodio para neutralizarlo.
- 5.- Secado de la probeta con secadora eléctrica.
- 6.- Pesada en balanza analítica, hasta 0,1 mg de precisión para probetas de 1 mm de espesor y hasta 0,01 g de precisión para las probetas de 3 mm de espesor.
- 7.- Las probetas limpias y pesadas serán protegidas con papel KRAFT, conservadas en bolsas plásticas selladas y embaladas para su traslado a las estaciones de ensayo.

Anexo 8. Limpieza de probetas de corrosión, expuestas

1.- Limpieza mecánica de la superficie de la probeta. Se efectúa con cepillo metálico hasta eliminar todos los sólidos depositados en la superficie de la probeta.

2.- Desengrasar la probeta sumergiéndola en acetona. Dejar remojando por 10 minutos. Retirarlo cuidadosamente con pinza metálica de acero 316 y ponerlo en una luna de vidrio hasta secarlo a condiciones atmosféricas. Este trabajo efectuarlo dentro de una campana de extracción.

3.- Inmersión de la probeta del paso 1, en un baño de decapado ácido a temperatura ambiente y dentro de la campana extractora. El tiempo de exposición es 5 - 10 minutos a la temperatura de 20 a 25 °C. La solución de decapado se prepara con 500 ml de ácido clorhídrico (HCl, sp gr. 1,19) y 3,5 g hexametilentetramina y se afora con agua destilada hasta 1 L. (ISO 9226).

4.- Retiro de la probeta del baño de decapado químico.

5.- Inmersión de la probeta en solución de carbonato de sodio (75g/L) para neutralizarlo.

6.- Secado de la probeta con secadora eléctrica.

7.- Pesada en balanza analítica, hasta 0,1 mg de precisión para probetas de 1 mm de espesor y hasta 0,01 g de precisión para las probetas de 3 mm de espesor.

8.- Las probetas limpias y pesadas serán protegidas con papel KRAFT, seguidamente serán guardadas en bolsas plásticas, selladas y embaladas para su traslado a las estaciones de ensayo.

Anexo 9. Captación de cloruros mediante el método de la vela

Este método consiste en exponer una gasa de área conocida, capaz de absorber los cloruros en el ambiente atmosférico, durante un determinado tiempo, al cabo del cual se extraen los cloruros de la gasa y se determinan expresando el resultado en $\text{mg/m}^2\cdot\text{d}$.

La vela húmeda está formada de una mecha insertada en una botella, (ver foto). La mecha consiste de un núcleo de 25 mm de diámetro, hecho de polietileno, sobre el cual es estirada una doble capa de Gasa. La superficie de la mecha expuesta a la atmosfera es de 100 cm^2 , el cual corresponde a una longitud de mecha de 120 mm. El área expuesta debe ser exactamente conocida. Un extremo de la mecha es introducido dentro de una tapa de caucho. La tapa de caucho debe tener 2 agujeros adicionales a través de los cuales pasa el extremo libre de la Gasa. Los bordes de los 3 huecos estarán dentro de un embudo, de tal forma que el líquido pueda correr por Gasa drenando hasta alcanzar el fondo de la botella.

La tapa es insertada dentro del cuello de una botella de polietileno de 500 ml. La botella contiene 200 ml de solución glicerol / agua (20% Vol. /Vol.) con ácido Octanoico agregado para prevenir el crecimiento de hongos. La solución es hecha mezclando 200 ml de glicerol con agua destilada hasta un volumen de 1 litro. A la solución se agrega 20 gotas de ácido Octanoico.



Fotografía.- Vela de Gaza para captar cloruros del medio ambiente, ISO 9225.

Anexo 10. Medición de humedad mediante termo higrómetros

Se Instalaran un termo higrómetro en la estación de mayor exposición a un ambiente marino, estación PN 30 y otro en la estación de Principal de Recolección de Petróleo, PTC Carrizo.

Los higrómetros a instalar son como los indicados en la fotografía.



Fotografía.- Higrómetros que fueron instalados en las estaciones E2 PN 32, E9 951 y E6 PTC.